

# コンクリート表面への飛来塩分量に基づく塩分浸透解析

コンクリート研究室 吉田 一貴  
 主指導教員 准教授 下村 匠

**要旨：**本研究は、構造物の長期的な塩分浸透性状を予測するため、構造物と同様の材料条件の薄い供試体を用いて、構造物と同環境下に供試体を暴露し、短期の塩分浸透試験結果から、数値解析によって求められた境界条件（環境条件）を適用することで長期的な構造物の塩分浸透性状を検証することを目的とし、本研究で所有する風洞型飛来塩分再現装置内に薄いモルタル供試体と厚いモルタル供試体を対象とした暴露実験および数値解析を行った。その結果、今回行った検討の範囲では、薄い供試体から求めた境界条件を適用し、厚い供試体への塩分浸透予測は可能であることが明らかとなった。

## 1. 背景および目的

塩分の浸透予測のためには、環境条件の評価が重要であり、環境条件は構造物によって異なることから、今日、環境作用の実測が勢力的になされており、実環境下の飛来塩分量や表面塩化物イオン濃度、塩化物イオン濃度などの実測結果から、環境作用の評価が多くなされている。本研究では、**図-1**に示すように、構造物の長期的な塩分浸透性状を予測するため、構造物と同様の材料条件の薄い供試体を用いて、構造物と同環境下に供試体を暴露し、短期の塩分浸透試験結果から、数値解析によって求められた境界条件（環境条件）を適用することで長期的な構造物の塩分浸透性状を検証することを目的としている。なお、本研究では、構造物の代わりに薄い供試体と同じ材料の厚い供試体を使用し、同環境下としては、本研究室で所有する風洞型飛来塩分再現装置<sup>1)</sup>を用いることとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験水準

実験水準を表-1に示す。実験水準は、W/C、飛来塩分量、供試体の厚さの違いを水準として計12水準で行った。表中に示す飛来塩分量は、

JIS-Z2382に規定されたガーゼ法に準拠し、事前に暴露位置の飛来塩分量を測定した値である。また、一般環境下と比べても大変多い飛来塩分量環境下とした。

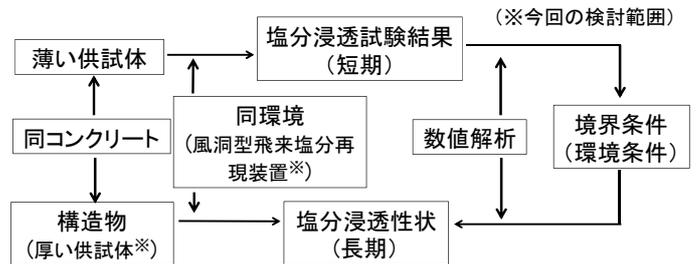


図-1 研究目的

表-1 実験水準

供試体 NO	W/C (%)	飛来塩分量「Gair」 (m/d/d)	供試体の厚さ
1	50	少 (64)	薄
2			厚
3		多 (98)	薄
4			厚
5	40	少 (75)	薄
6			厚
7		多 (112)	薄
8			厚
9	30	少 (67)	薄
10			厚
11		多 (149)	薄
12			厚

## 2.2 暴露供試体

暴露供試体を図 - 2 に示す。暴露供試体は、断面 40mm×40mm に対して、厚さ 10mm と 100mm のモルタル供試体とした。また、供試体には、飛来塩分到達面以外から塩分が浸透しないように、被覆を施した。

## 2.3 暴露環境と供試体の設置方法

本実験は、写真 - 1 に示す風洞型飛来塩分再現装置（以下、風洞と省略）を使用して行った。図 - 3 に本装置の概略図を示す。本装置の特徴として、種々の環境作用を受けないこと、飛来塩分量を調整可能なことが挙げられる。風洞内では、塩水噴霧発生ユニット（写真 - 3）によって噴霧された塩分が造風ユニット（写真 - 2）から送風される風によって風洞内を循環する仕組みとなっ

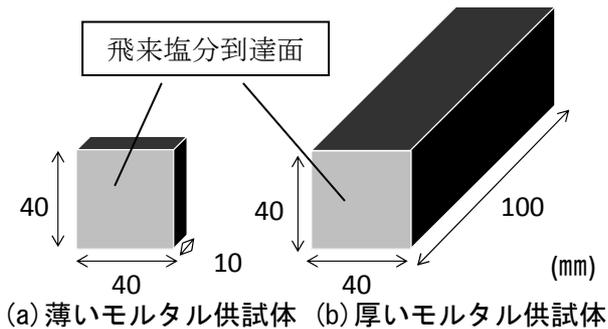


図 - 2 暴露供試体



写真 - 1 風洞型飛来塩分再現装置

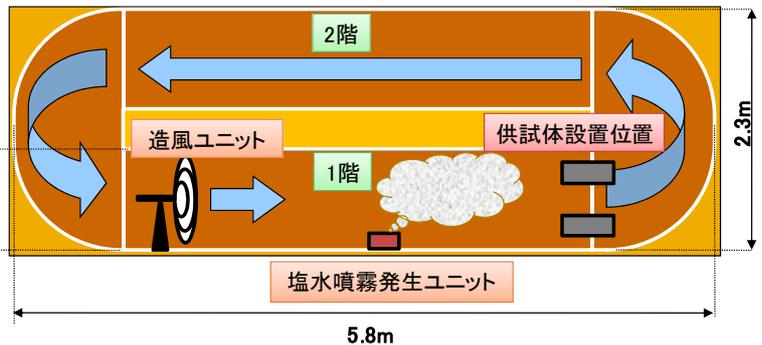


図 - 3 風洞型飛来塩分再現装置（内部の概要図）



写真 - 2 造風ユニット



写真 - 3 塩水噴霧発生ユニット

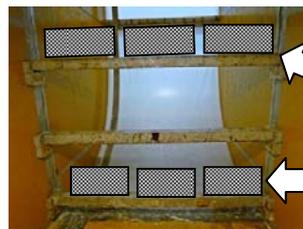


写真 - 4 供試体設置位置



写真 - 5 暴露供試体

ている。なお、塩水は塩水噴霧発生ユニットから 1 時間おきに 5 秒間、塩分濃度 3% の塩水が噴霧される設定として実験を行った。供試体は、写真 - 5 に示すように、同飛来塩分量で供試体の暴露を行う必要があるため、薄い供試体と厚い供試体を並べて設置し、写真 - 4 に示すように設置した。

## 2.4 分析試料と分析方法

分析試料は、それぞれ、表面に付着した余分な塩分をガーゼで拭き取った後、薄いモルタル供試体は、ミルで供試体を丸々粉砕して試料とした。厚い供試体は、グラインダで表面の試料と採取し、その後、ドリル穿孔によって、深さ位置の試料を採取した。そして、採取した試料は、JCI - SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に基づいてイオンメータを使用して全塩分量の測定を行った。

## 3. 数値解析概要

### 3.1 数値解析プログラム

数値解析では、コンクリートの細孔構造に基づき、水分移動と塩分移動を連成的に解いた数値解析プログラムを用いて行った。

### 3.2 境界条件

数値解析では、コンクリート表面の塩分浸透を表現する境界条件として、固定境界条件と自然境界条件を適用して行った。

固定境界条件は、式（1）で表現した。

$$C(o,t) = C_o \quad (1)$$

ここに、 $C_{(0,t)}$ ：時間  $t$  におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $C_o$ ：コンクリート表面の塩化物イオン濃度 [kg/m<sup>3</sup>]

自然境界条件は、気中に置かれたコンクリートの熱伝達境界、湿度伝達境界モデルと同型の、式（2）で表現した。

$$j = -m \cdot \{C_f(0,t) - \beta \cdot V_l \cdot C_a(t)\} \quad (2)$$

ここに、 $j$ ：境界における塩化物イオンの流出入流束 [kg/m<sup>2</sup>/s]（流入を正とする）、 $m$ ：塩化物イオンの侵入に関する表面伝達係数 [m/s]、 $C_f(0,t)$ ：表面近傍のコンクリート中の自由塩化物イオン量 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\beta$ ：コンクリート表面に到達する飛来塩分量とその飛来塩分環境下で平衡するコンクリート中の液状水中の自由塩化物イオン濃度の関係を表す実験定数 [s/m]、 $V_l$ ：コンクリート単位体積中の液状水体積 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]、 $C_a(t)$ ：コンクリート表面に到達する飛来塩分量 [kg/m<sup>2</sup>/s]または[mg/dm<sup>2</sup>/day]

## 4. 実験結果

本実験では、W/Cの違いによって、塩分の浸透量は異なるものの、同様の傾向が得られたことから、W/C=50%のみの結果を示す。

### 4.1 薄いモルタル供試体の実験結果

W/C=50%の薄いモルタル供試体の塩分浸透結果を図-4に示す。飛来塩分量の違いによって、塩

分の浸透量に違いが見られる。飛来塩分量が多くなれば、塩分の浸透量も多いことが見てとれる。また、経時変化に伴い、塩分の浸透は、平衡状態に近づいていることが伺える。

### 4.2 厚いモルタル供試体の実験結果

W/C=50%の厚いモルタル供試体の塩分浸透結果を図-5に示す。薄いモルタル供試体同様に飛来塩分量が多くなれば、塩分の浸透量も多いことが見てとれる。また、表面は、暴露開始から初期の段階大変多くの塩分が浸透していることが見てとれる。しかし、内部に関して、暴露開始56日時点の表面から20mmより深い位置では、塩分がまだ浸透していない。このことから、今後、さらに長期の暴露実験を行い、実験データの取得が必要である。

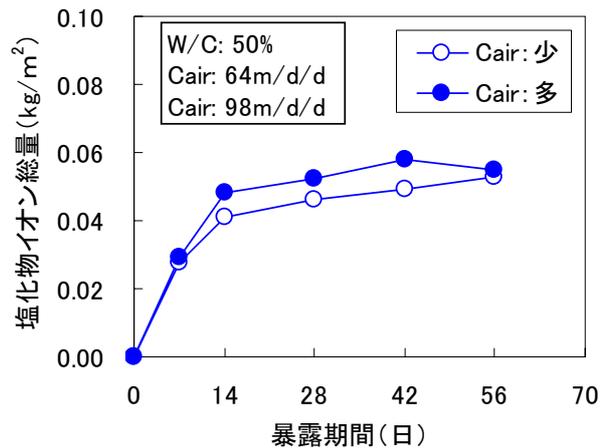


図-4 薄いモルタル供試体の実験結果

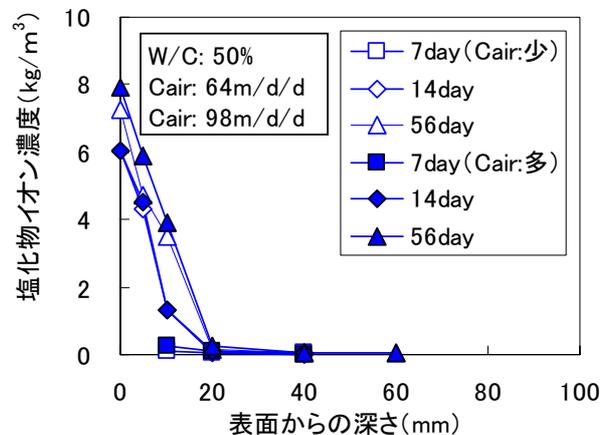


図-5 厚いモルタル供試体の実験結果

## 5. 数値解析結果

### 5.1 薄いモルタル供試体の数値解析結果

W/C=50%の薄いモルタル供試体の数値解析結果を図-6に示す。数値解析は、固定境界条件、自然境界条件ともに浸透する塩分の総量の終局値が一定になるように行った。

### 5.2 厚いモルタル供試体の数値解析結果

W/C=50%、飛来塩分量「多」の厚いモルタル供試体の数値解析結果を図-7に示す。解析結果を見ると、固定境界条件、自然境界条件ともに同様の結果が得られていることが見てとれる。また、両者とも、解析値は実験値を再現していることが見てとれる。しかし、W/C=40, 30%では、内部の実験値は再現しているが、表面の塩分に乖離が見られた。これは、供試体表面の試料は、グラインダを使用して採取していることから、採取した試料がモルタルであるのかセメントペーストであるかの違い、あるいは、W/Cが小さくなれば、単位セメント量が増えるため、表面近傍に固定される塩分が増えることが大きな要因と考えられる。

## 6. 厚いコンクリート供試体への適応性の検討

本項では、飛来塩分再現装置を用いて本研究室で行った既往の研究データを参考とし、5.と同様の手法で薄いモルタル供試体の塩分浸透結果ら、数値解析を行い、厚いコンクリート供試体の塩分浸透性状を再現可能か検討した。なお、5.において、固定境界条件、自然境界条件ともに同様に飛来塩分量の影響を再現できていることが確認されたことから、本項では、固定境界条件のみを適用して数値解析を行った。

### 6.1 飛来塩分量が100m/d/dの環境下の数値解析結果

厚いコンクリート供試体の実験値は、W/C=55%、飛来塩分量100m/d/d、暴露期間91日の既往の研究データを参考に数値解析を行った。薄いモルタ

ル供試体の短期の塩分浸透結果としては、上記の研究データと同程度である本研究で行ったW/C=50%、飛来塩分量98m/d/dを適用した。図-8に厚いコンクリート供試体の数値解析結果を示す。実験値と解析の比較を行うと、解析値は、実験値を再現できていることが分かる。また、図中には、長期の塩分浸透予測として、5年、10年後の数値解析を行い、その結果も示している。

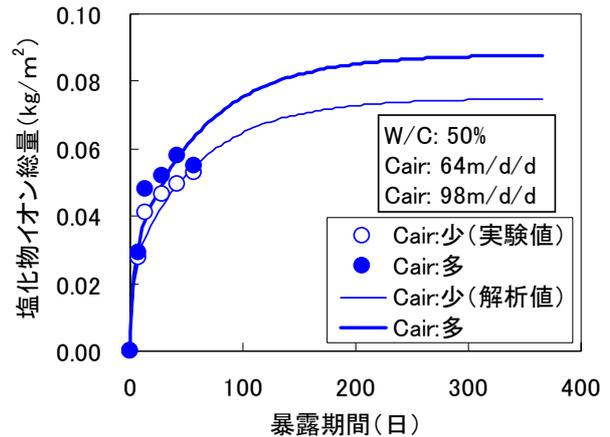


図-6 薄いモルタル供試体の数値解析結果

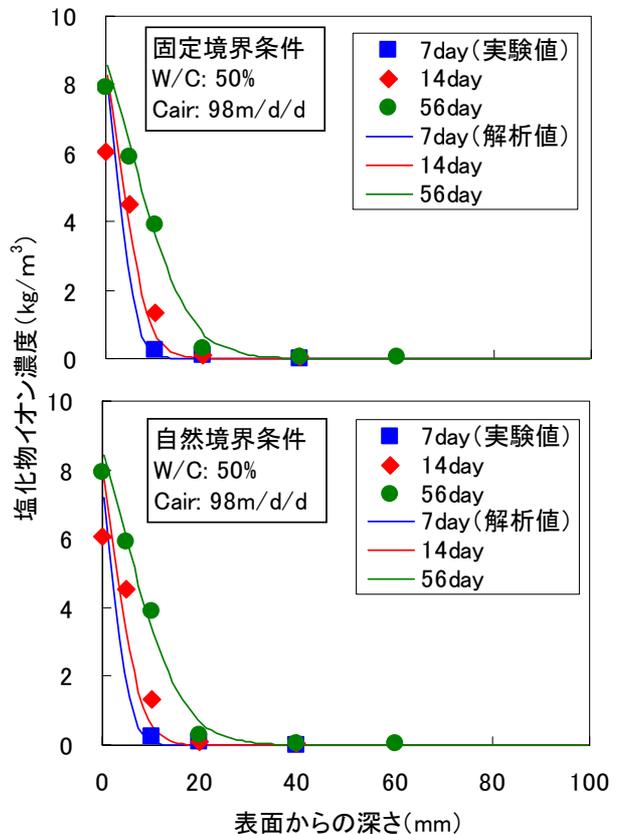


図-7 厚いモルタル供試体の数値解析結果

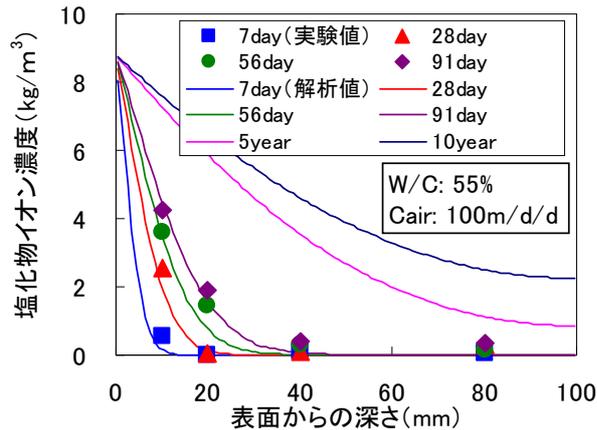


図 - 8 厚いコンクリート供試体の数値解析結果

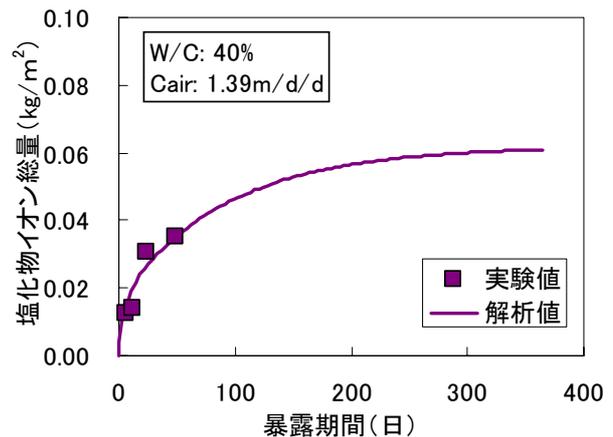


図 - 9 薄いモルタル供試体の数値解析結果

## 6.2 飛来塩分量が約 3m/d/d の環境下の数値解析結果

厚いコンクリート供試体の実験値は、W/C=40%、飛来塩分量 2.97m/d/d、暴露期間 240 日の既往の研究データを参考に数値解析を行った。薄いモルタル供試体の短期の塩分浸透結果も上記の研究データと同程度である W/C=40%、飛来塩分量 1.39 m/d/d の既往の研究データを参考とした。図 - 9 に薄いモルタル供試体の解析結果を示す。また、図 - 10 に厚いコンクリート供試体の数値解析結果を示す。実験値と解析値の比較を行うと、解析値は、実験値を概ね再現できていることが分かる。

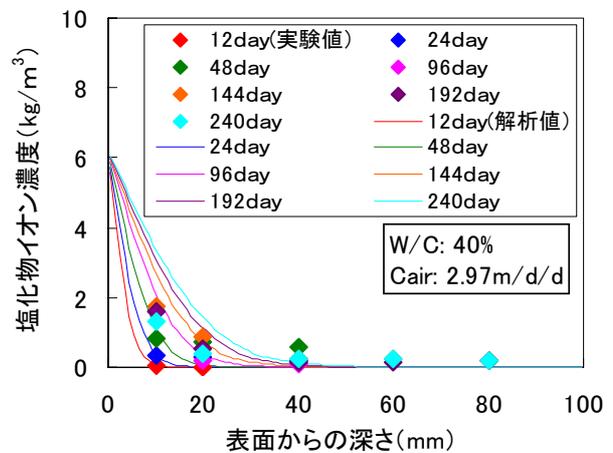


図 - 10 厚いコンクリート供試体の数値解析結果

## 7. 結論

今回行った検討の範囲では、実験室内で理想的に管理された風洞型飛来塩分再現装置を用いて、薄い供試体から求めた境界条件を適用し、厚い供試体への塩分浸透予測は可能であることが明らかとなった。ただし、厚い供試体の実験値は、実構造物と比べても短期であることから、長期的な検証が必要である。また、固定境界条件、自然境界条件ともに飛来塩分量の影響を表現できていることが明らかとなった。

## 8. 参考文献

- 1) 上浦健司：コンクリートへの飛来塩分の到達と侵入過程の再現実験，長岡技術科学大学修士論文，2009.3