

飛来塩分の影響を受けるコンクリートの表面塩分に関する再現実験

コンクリート研究室 山下寛生

指導教員 下村 匠

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害による劣化の進行を予測するためには、構造物に塩害を生じさせる環境作用を境界条件として与える必要がある。これは、構造設計において構造物に作用する荷重を与えることに相当し、構造物の塩害の劣化進行をその構造物の気象条件や立地条件に応じて精度よく予測するためには、対象となる構造物の塩害に関する環境作用を的確に評価することが不可欠である。構造物の塩害に関する環境作用の境界条件として最も支配的であるのは、コンクリート表面の塩分濃度である。コンクリートの表面塩分濃度は、風によって輸送された海水粒子が構造物に到達し、その後降雨による洗い流しや日照などの影響を受けて残った塩分がコンクリート表面に付着することによって定まる。

土木学会コンクリート標準示方書では、Fickの拡散方程式を用いた線形拡散モデルにより、コンクリート中の塩分の移動を計算する方法が導入されている。この方法において、境界条件である表面塩分濃度は、海岸からの距離に応じて値が与えられている。海岸からの距離で表面塩分濃度を与えると、日本全国一律に海岸からの距離の関数で劣化外力（環境条件）を表すことになり、構造物の地域差や各部位による塩分の飛来状況の違いが反映されないといった問題点が生じる。このため、構造物に海水粒子が飛来する過程に焦点をあて、構造物への到達塩分を数値シミュレーションすることにより、飛来塩分到達の理論的予測を行う研究が行われている。しかし、コンクリート表面の塩分量（表面塩分濃度）はコンクリート表面に到達する塩分量だけでなく、コンクリートの品質や、洗い流しや日照などの影響を受けるので、飛来塩分の数値シミュレーションだけ

では予測できない。このため、塩害環境下における現地観測と暴露試験により、コンクリート表面の塩分量の実測調査が行われている。しかし、現地観測では調査地点が限られていることや、現地観測と暴露試験には長期的な時間を要するといった問題点が挙げられる。実測調査である現地観測と暴露試験によらず比較的短時間に、様々な環境条件下におけるコンクリート表面の塩分量を評価する方法を構築する必要がある。

そこで本研究では、室内における模型実験により、コンクリート表面への塩分到達—コンクリート中への浸透の再現を行い、コンクリート表面に到達する塩分量およびその時系列変化と表面塩分濃度の関係を定量的に検討し、降雨による洗い流しや日照といった環境作用が表面塩分濃度に及ぼす影響を検討することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 飛来塩分発生装置

飛来塩分発生装置の概要を図-1に示す。断面が40cm×40cmの亚克力製の水路を用い、水路内に設置した海水中に気泡発生装置を設置し、海水中に気泡を発生させ、気泡が海水面ではじけることによって海水粒子を発生させた。この海水粒子を送風機によって飛来させ、供試体に塩分を到達、付着する構造とした。さらに水路上部を塞ぎ、水路端部から風洞を設置することにより、水路内に風を循環させ、一定の風速を維持し、常に一定の飛来塩分が供給される構造とした。また、飛来塩分発生源から供試体までの距離及び、風速を変化させることにより、飛来塩分強さを調節した。予備実験の結果、塩分到達—浸透の再現実験では、飛来塩分発生源から供試体までの距離を85cm、風速2.44m/sec一定とした。

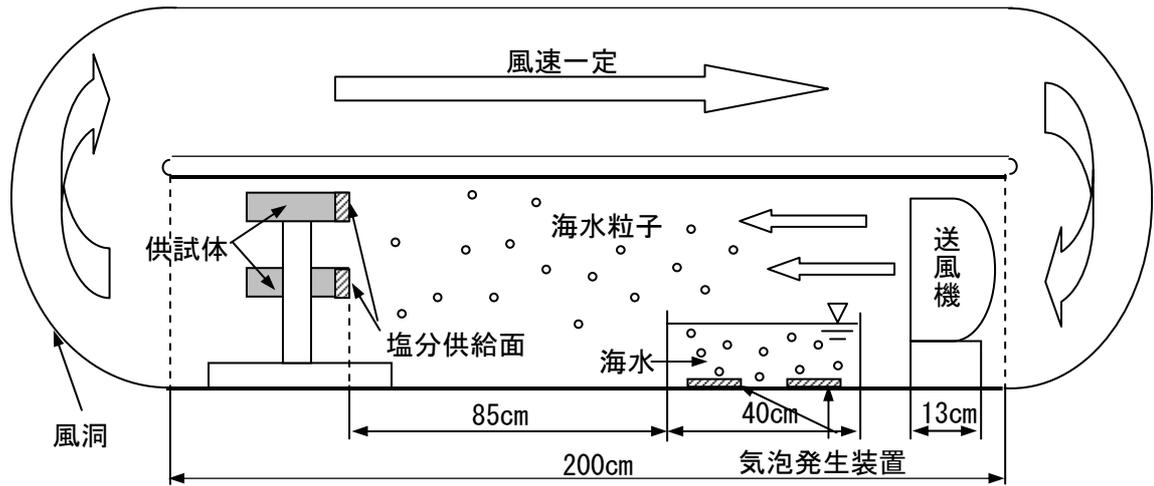


図-1 飛来塩分発生装置概要

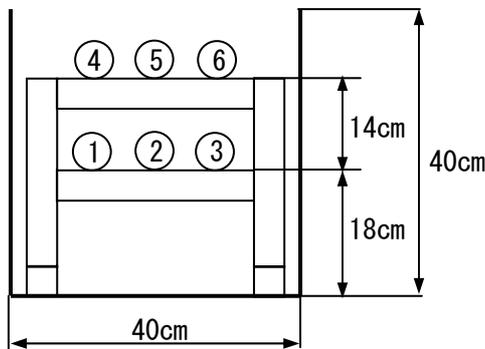


図-2 水路断面



図-3 飛来塩分発生状況

表-1 示方配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
50	2.1	338	675	1176

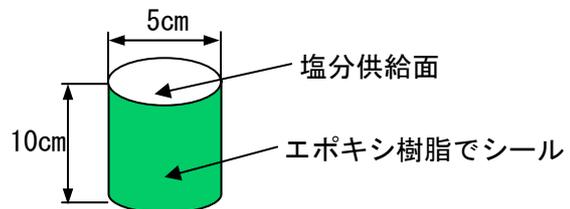


図-4 供試体概要

2.2 飛来塩分捕集方法

供試体設置位置における飛来塩分をガーゼ法を用いて捕集した。障害物の影響を受けずに大気中を飛来する塩分の輸送量(通過塩分量)は、風がガーゼを透過する方法で採取した。空気中に置かれた物体に衝突し、付着する塩分(到達塩分量)は、ガーゼ裏面にプラスチック板を入れ、風がガーゼを不透過としたもので捕集した。捕集した塩分の分析は、ガーゼをイオン交換水に浸し、その水溶液中のCl濃度を塩化物イオンメーターを用いて測定した。その後、塩分付着時間及び受風面積をもとに、単位時間・単位面積あたりの付着塩分量(mg/dm/day)を算出した。

2.3 供試体

供試体の示方配合を表-1に示す。供試体はモルタルとし、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比50%とした。フロー値は185mmである。

供試体の形状を図-4に示す。飛来塩分発生装置の断面寸法を考慮して、φ5×10cmの円柱供試体を用いた。供試体は材齢28日まで水中養生を行った後、試験開始まで実験室内で気中養生した。気中養生中に塩分供給面以外をエポキシ樹脂でシールした。

2.4 塩分分析

塩分付着面からの塩分濃度分布を測定するた

めに、塩分付着面から 5, 20, 30, 40, 50, 60mm 間隔に供試体側面から $\phi 5\text{mm}$ のドリルで穴をあけ、粉末状の試料を採取した。

試料の塩分濃度の分析は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて塩分濃度分布を測定した。

3 飛来塩分量と到達塩分量の関係の検討

図-5 各供試体設置位置において捕集した飛来塩分量である。図-2 に示すように、供試体設置位置が上段である 4~6 は、設置位置が下段である 1~3 の値に比べて飛来塩分量が約 50%程度となっている。設置位置下段には、海水をエアレーションさせて発生させた海水粒子の中でも比較的粒径の大きい粒子が付着しており、設置位置上段には比較的粒径の小さい粒子が付着していることが目視により確認することができた。粒径が大きい粒子は慣性力が大きいため、海水粒子が直接付着しやすい。このため、供試体設置位置が下段は飛来塩分量が多くなる傾向となったと考えられる。

通過塩分量と到達塩分量を比較すると、到達塩分量が通過塩分量の約 10%程度となっている。冬季の日本海側でのガーゼ法による現地観測を行った結果、到達塩分量は通過塩分量の 3%~10%程度であったと報告されていることから、塩害環境をほぼ再現していることが確認できる。

4 到達塩分量と表面塩分濃度に関する検討

4.1 実験ケース

飛来塩分量と表面塩分濃度の基礎的検討として、飛来塩分を連続的に付着させ、暴露時間をパラメーターとした再現実験を行った。飛来塩分発生装置の下段に設置した供試体を 1~3, 上段に設置した供試体 4~6 とし、設置位置下段での塩分付着時間を 3, 6, 9, 12, 15, 18 日、設置位置上段での塩分付着時間を 12, 15, 18, 21, 24, 27 日とした。

また、実構造物においては、常に連続的に飛来

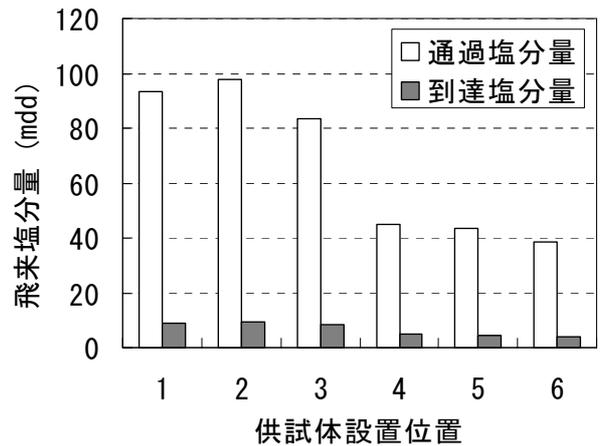


図-5 塩化ビニール製風洞を用いた飛来塩分量

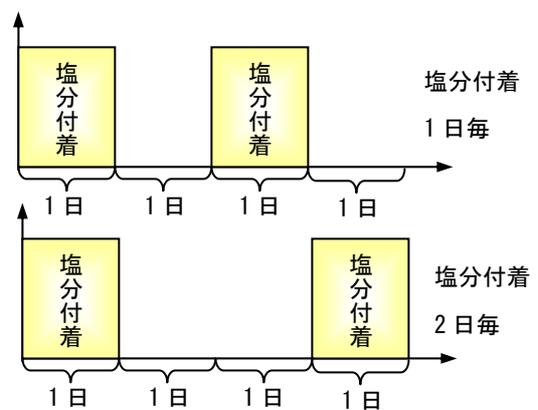


図-6 断続的に塩分付着 模式図

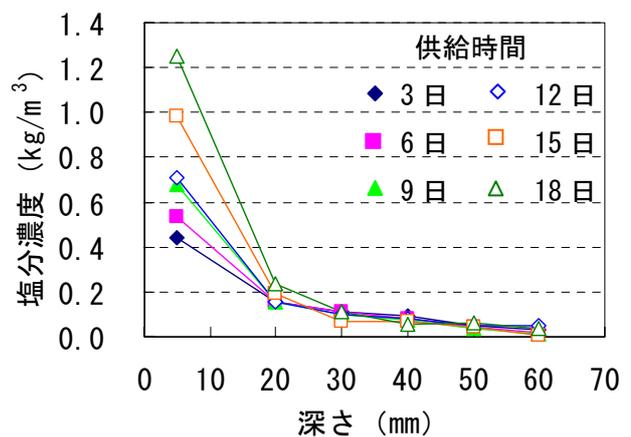


図-7 設置位置下段における塩分濃度分布

塩分が到達するのではなく、塩分が付着する期間と付着しない期間があり、時間的に飛来塩分が変化する。このため、飛来塩分が時間的に変化する場合の表面塩分濃度の検討を行うために、飛来塩分を断続的に付着させた。図-6 は断続的に塩分

を付着した場合の模式図である。塩分付着間隔は1日毎と2日毎とした。

4.2 暴露時間と浸透塩分量の関係

図-7, 図-8は, 供試体設置位置下段及び上段における供試体の塩分濃度分布である。供試体設置位置が下段及び上段ともに, 暴露時間の増加とともに供試体内部の塩分濃度が上昇していく傾向にある。これらの傾向より, 暴露時間の増加に伴い, 塩分の総付着量が増加したため, 供試体内部への浸透量が増加する傾向が確認できた。このことは, 供試体表面に到達した塩分が塩分付着面から徐々に内部に浸透していることを示すものと考えられる。

4.3 暴露時間と表面塩分濃度の関係

供試体の塩分濃度分布の実測値と, Fickの拡散方程式の解である式(1)を用いた計算値の誤差が最小となる表面塩分濃度を, 最小二乗法を用いて算出した。また, 式(2)を用いて見かけ拡散係数を算出した。表面塩分濃度算出に用いた見かけの拡散係数は $D=5.2 \times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 一定とした。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1)$$

$$\log D = [4.5(W/C) + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7) \quad (2)$$

図-9に表面塩分濃度の経時変化を示す。到達塩分量が9mdd程度の場合, 暴露時間が3~9日においては, 時間の経過とともに表面塩分濃度が減少する傾向にある。しかし, 暴露時間が12~18日においては, 時間の経過によらず, 概ね一定の値を示している。到達塩分量が4mdd程度の場合, 暴露時間が12~27日の全てのケースにおいて, 時間の経過に因らず, 概ね一定の値を示している。

以上の結果より, 暴露時間がある程度以上の長期にわたると, 表面塩分濃度は時間の経過に因らず概ね一定の値と考えてよいことが明らかとなった。

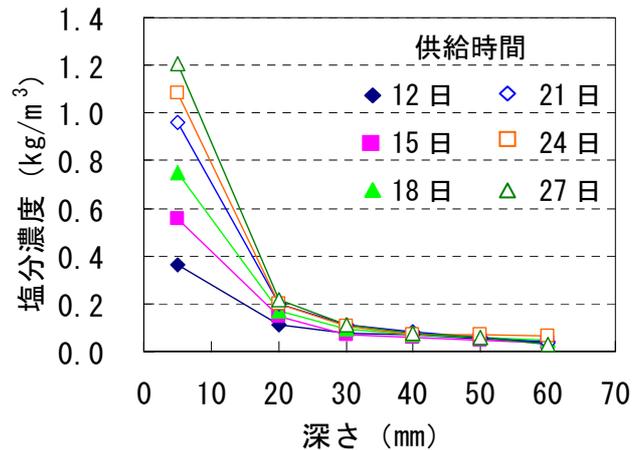


図-8 設置位置上段における塩分濃度分布

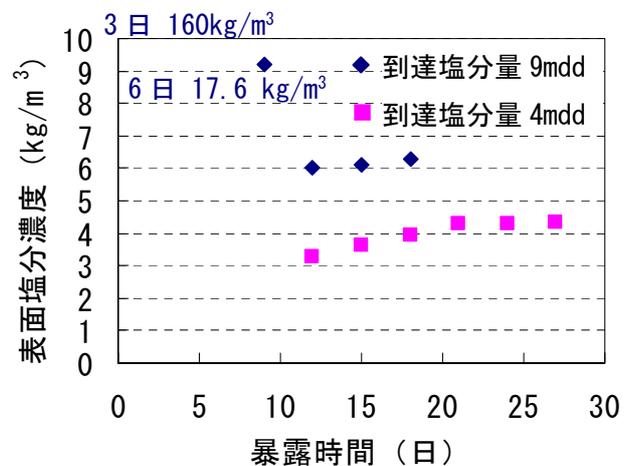


図-9 表面塩分濃度の経時変化

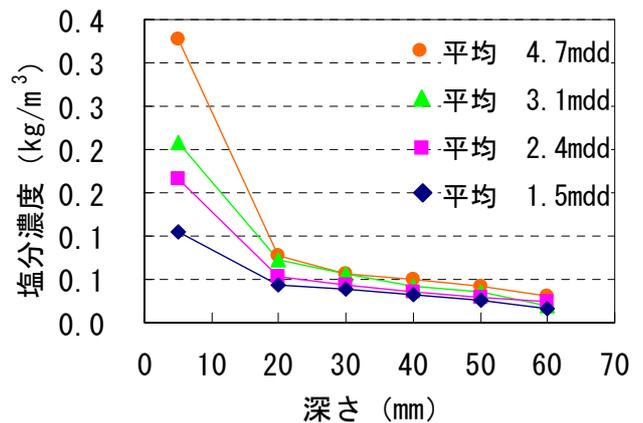


図-10 断続的に塩分付着 塩分濃度分布

4.4 飛来塩分が時間変化する場合の浸透塩分量

図-10は, 飛来塩分を断続的に付着させた場合の供試体の塩分濃度分布である。塩分を断続的に付着させたため, 暴露時間あたりの平均到達塩分量を指標とした。平均到達塩分量の増加にもな

い、塩分濃度が増加する傾向にある。これらの傾向より、平均到達塩分量が増加することにより塩分供給量が増加し、供試体内部への浸透量が増加することが明らかとなった。

4.5 表面塩分濃度と到達塩分量の関係

図-11 に表面塩分濃度と到達塩分量の関係を示す。図中の直線は、塩分が連続的に付着した場合の近似直線である。塩分を断続的に到達させた場合の表面塩分濃度の実測値は、塩分が連続的に到達した場合の近似直線と概ね一致することが確認できる。この結果より、塩分が連続的に到達する場合においても、時間的に変化する場合においても、暴露時間中に到達した塩分の単位時間あたりの平均値（平均到達塩分量）を指標として用いることにより、表面塩分濃度を推定することが可能であることが明らかとなった。

5. 表面塩分濃度におよぼす環境作用の影響

5.1 洗い流し再現実験

飛来塩分供給中に、真水を噴霧することにより降雨による洗い流しを再現した。新潟県の11月～2月の月降水量（1971～2000年の平均値）が約300mmであったことから、1日平均降水量を10mmと仮定し、洗い流し強さを総降水量10mm一定として、洗い流し時間を1日毎に2時間とした。図-12は洗い流し再現実験の模式図である。洗い流しの再現は、飛来塩分発生装置とは異なる装置を用いているため、洗い流し再現中は塩分が供給されていない。また、暴露時間は12日間とした。

5.2 日照再現実験

飛来塩分供給中に、40℃の炉乾燥を行うことにより日照による乾燥を再現した。図-13は日照再現実験の模式図である。塩分付着と40℃乾燥を1日毎に行った。また、暴露時間は12日間とした。

5.3 環境作用を再現した供試体の塩分濃度分布

図-14は、洗い流しを再現した供試体の塩分濃度分布である。洗い流しが作用することによって塩分濃度が低下している。図-15は、日照による

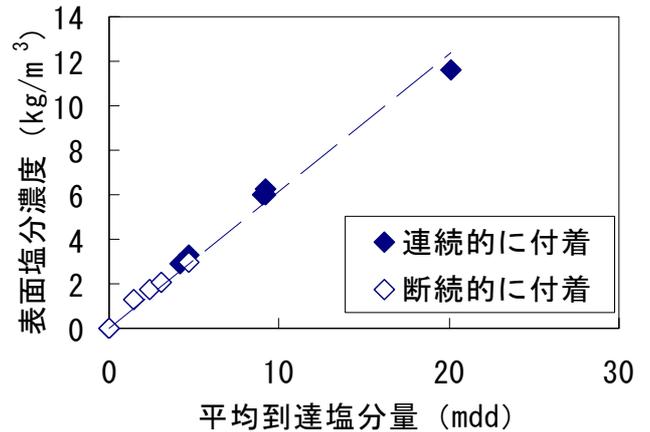


図-11 表面塩分濃度と到達塩分量の関係

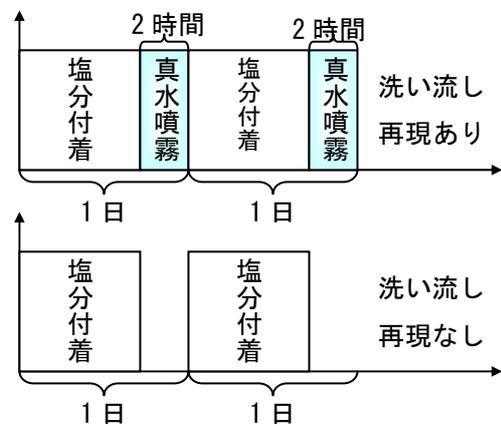


図-12 洗い流し再現実験模式図

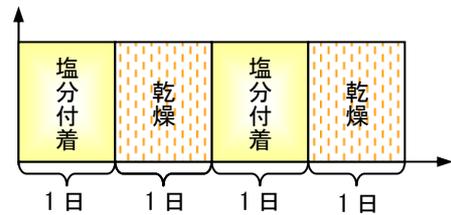


図-13 日照再現実験模式図

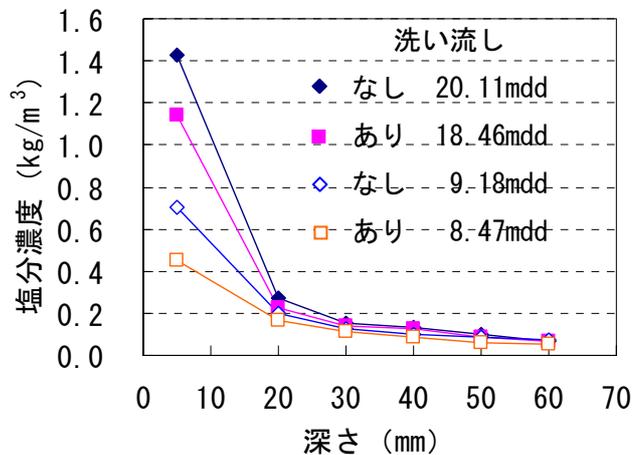


図-14 洗い流し実験における塩分濃度分布

乾燥を再現した供試体の塩分濃度分布である。乾燥が作用することによって塩分濃度が増加している。これらの傾向より、洗い流しによって供試体表面に付着した塩分が流されることにより、供試体内部への浸透量が低下、乾燥によって供試体内部への浸透量が増加することが明らかとなった。

5.4 表面塩分濃度と環境作用

Fick の拡散方程式の解である式(1)を用いて、

4.3 と同様に表面塩分濃度を算出した。

図-16 は表面塩分濃度と環境作用の関係である。洗い流しが作用することにより、表面塩分濃度は低下する傾向にあり、到達塩分量と表面塩分濃度は直線的な関係にある。また、日照が作用することにより、表面塩分濃度が増加する傾向にあり、到達塩分量と表面塩分濃度は直線的な関係にある。これらの傾向より、到達塩分量と表面塩分濃度は直線的な関係にあることから、到達塩分量から表面塩分濃度を評価することが可能であることが示唆された。

6. 現地観測と再現実験

図-17 に国土技術政策総合研究所による現地観測結果と、本再現実験によって得られた実験値との関係を示す。現地観測結果と再現実験結果がほぼ同様な値を示していることから、室内における再現実験を用いることにより、現地観測と同様に表面塩分濃度を評価することが可能であることが示唆された。

7. まとめ

- (1) 飛来塩分発生装置を作製し、室内において塩分付着現象を再現することができた。
- (2) 飛来塩分が時間的に変化する場合は、平均到達塩分量として整理することにより、表面塩分濃度の推定が可能であることが示唆された。
- (3) 表面塩分濃度と到達塩分量は直線関係にあり、洗い流しが作用することによって表

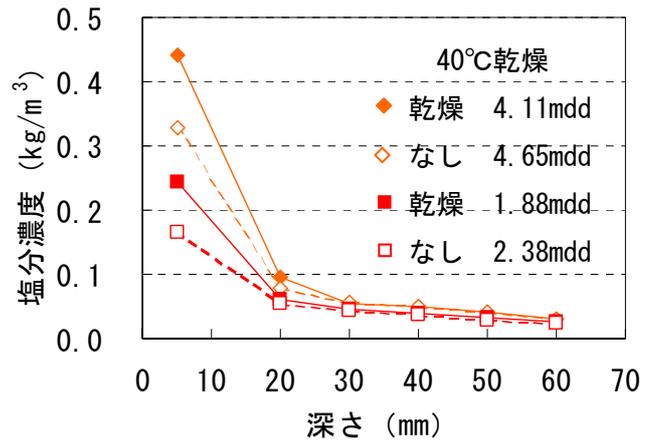


図-15 日照再現実験における塩分濃度分布

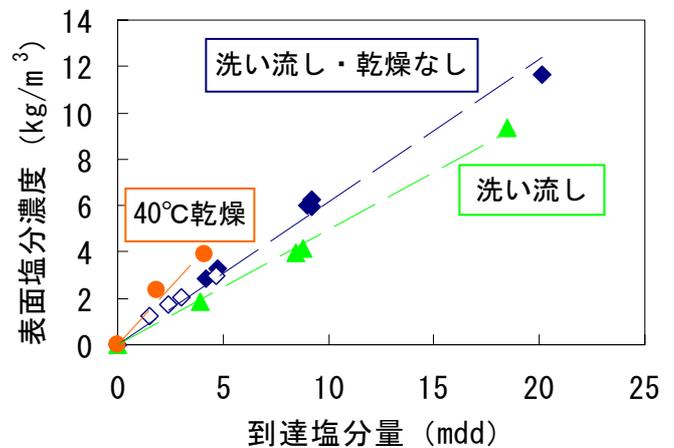


図-16 表面塩分濃度と環境作用の関係

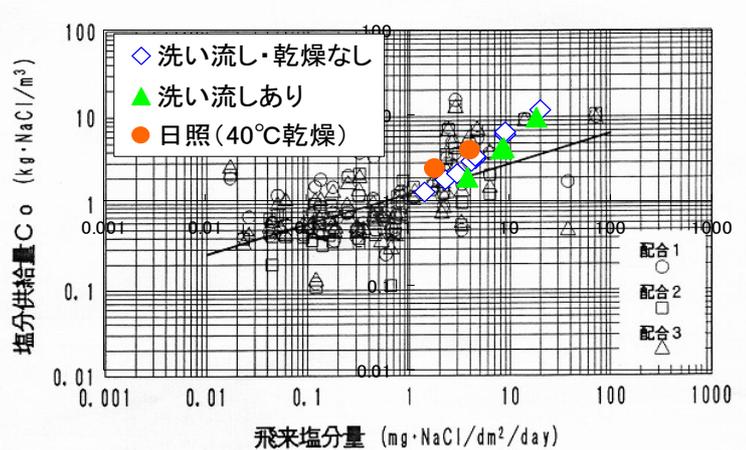


図-17 現地観測結果と再現実験結果の関係

面塩分濃度は減少し、乾燥によって表面塩分濃度は低下する。

- (4) 室内実験において実構造物の調査と同様に、表面塩分濃度を評価することが可能であることが示唆された。