

# 学位論文の要旨

氏名

小池 賢太郎

学位論文題目

コンクリート中の水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響  
に関する基礎的研究

現在、コンクリート中への塩化物イオンの浸透予測手法として用いられるFickの拡散方程式による濃度拡散モデルは、モデルとしての簡便さや優れた適用性から多くの塩害に対する耐久性照査に用いられてきた。一方で、実環境における塩化物イオンの浸透の駆動力は濃度拡散だけではなく、乾湿繰り返しに伴う水分移動の影響や塩化物イオンの吸着・固定化、さらには中性化に伴う塩化物イオンの濃縮など、様々であり、現状ではこれらをまとめて巨視的な拡散現象として扱っている。しかし、実構造物のほとんどが、干満帯や飛沫帯のように、乾燥と海水の供給がある、乾湿繰り返し履歴を受ける環境に曝されていることから、水分移動を濃度拡散に包含したままにするのは必ずしも好ましくはない。現行の鉄筋コンクリート構造物の設計や維持管理計画における塩害耐久性照査では、見かけの拡散係数は同一材料であっても環境条件によって変えて水分移動やその他塩分浸透の要因を考慮している。しかし近年では、水分移動の影響により、遮塩性の優れたコンクリートでは塩化物イオンの拡散場となる液状水の移動が抑制され、塩化物イオンの浸透が停滞する、濃度拡散では説明できない現象も報告されている。このように、現行の塩化物イオンの濃度拡散モデルでは、水分移動の影響は予測の精度を大きく狂わせる可能性をはらんでいる。にもかかわらず、空隙中の液状水の移動に伴う塩化物イオンの移動特性に関して、具体的に水分移動と塩化物イオンの浸透との関連性を検討した事例は殆どなく、未だ不明瞭な点が多い。

そこで本研究では、コンクリートが吸水を受ける場合や乾湿履歴を受ける場合の塩化物イオンの浸透特性を実験的に検討し、そのメカニズムを明らかにするとともに、水分移動を考慮した塩化物イオン浸透予測手法の構築およびその適用範囲を示すことを目的とした。

本論文は、以下に示すように8章からなる。

第1章は、本論文の背景および目的を明確にし、論文の構成を示した。

第2章は、塩害におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透媒介である水に着目して、コンクリート中における水分移動現象の分類について述べ、これまでに多くの研究者らにより検討されてきた水分移動モデルについて整理した。また、鉄筋コンクリート構造物に対する塩害の劣化機構や、塩害の耐久性照査で用いられる塩化物イオンの濃度拡散モデルについて述べるとともに、塩化物イオン浸透における水分移動問題について取り上げ、現行の濃度拡散モデルの課題点を抽出した。

第3章は、未だ十分に検討されていない、コンクリート中における水分移動が塩化物イオンの浸透に及ぼす影響を把握するために、疑似飽和状態および絶乾状態のモルタルを使用して、吸水現象における水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を水セメント比やセメント種類の影響に着目して実験的に検討した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・モルタル中の水分状態が疑似飽和状態の場合、吸水現象は確認されず、塩化物イオンの浸透はFickの濃度拡散モデルに従った。
- ・絶乾状態から吸水を受けると、短時間で急速に水分がモルタル内部に移動することが確認された。その時の飽和度分布の特徴として、浸透面から直線型の分布を示す液状水の移動と、拡散型の分布を示す水蒸気拡散が存在する。
- ・さらに、この時の塩化物イオンの浸透状況はFickの濃度拡散モデルに従わず、液状水の移動に伴う浸透と濃度拡散による浸透と移流拡散現象に従っている。

- ・吸水による水分移動特性は、水セメント比やセメント種類の影響を強く受け、特に低水セメント比や高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を使用することで、水分移動およびそれに伴う塩化物イオンの浸透を著しく抑制する。
- ・また、水セメント比やセメント種類の影響はすべて空隙構造に帰着され、水分移動深さや塩化物イオンの浸透深さ、そして見かけの拡散係数は空隙構造と良好な相関を示す。

第4章では、第3章の「吸水現象を受けるコンクリートへの塩化物イオン浸透特性の実験的検討」から得られた結論を基に、吸水現象を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよびそれに伴う塩化物イオンの浸透モデルの構築を行った。

数値解析の結果、今回構築した水分移動モデルは、空隙内部に拘束された空気の影響を十分に評価できなかったものの、液状水の移動と水蒸気拡散による水分移動の大まかな傾向は捉えられており、高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材を使用したケースで確認された、液状水の移動停止も再現できた。

第5章は、異なる乾燥条件での乾湿繰り返し試験を実施して、乾湿繰り返し履歴における水分移動特性および塩化物イオン浸透特性を実験的に検討した。

その結果、以下の結論が得られた。

- ・乾湿繰り返し履歴において、乾燥過程時の乾燥湿度が低いほど供試体表面での飽和度の低下が顕著となったが、乾燥が認められた深さは乾燥湿度によらず3~4cm程度となる。
- ・また、サイクル数の経過に伴って乾燥過程における水分乾燥量が減少する傾向が確認された。これは、サイクル経過で供試体空隙中の塩化物イオン濃度が増加し、水蒸気圧降下により、水分が乾燥しにくくなったからである。そして、供試体表層の塩化物イオン濃度と乾燥量との間に良好な相関関係が示された。
- ・一方、吸水過程では、乾燥過程から吸水過程に移行することで、乾燥した領域への水分移動が確認された。しかし、飽和度分布は初期状態の飽和状態にまでは戻らず、むしろ吸水による液状水の移動は浸透面からの1点目で停止しており、1cm以降では水分の移動は認められなかった。これは、供試体空隙中の空気の拘束が考えられ、乾燥よりの空隙中の液状水が逸散することで空気が残り、吸水過程に移行した際に、残った空気は抜けることなく空隙中に取り込まれることで、吸水過程での液状水の移動を阻害したと考えられた。
- ・ただし、塩化物イオンの阻害は確認されず、拘束空気により分断された空隙以外の液状水で満たされた連続している空隙を介して、塩化物イオンは内部へ拡散浸透したことが考えられた。

第6章では、第5章の「乾湿繰り返し履歴を受けるコンクリートの塩化物イオン浸透特性に関する実験的検討」から得られた結論を基に、乾湿繰り返し履歴を受けるコンクリートへの水分移動モデルおよび塩化物イオン浸透モデルの構築を行った。まず、乾燥過程における水分移動は、既往の秋田モデルを適用した。一方、吸水過程では、第4章で検討した吸水現象における水分移動モデルおよび塩化物イオンの浸透モデルを適用した。数値解析の結果、乾湿繰り返し履歴による供試体表層部での塩化物イオン量の増加現象を評価できた。

第7章は、第4章および第6章をとおして構築した「水分移動を考慮した塩化物イオン浸透モデル」について、数値シミュレーションをおこない、乾湿繰り返しなどの水分移動がある環境でも、現行の拡散モデルで対応できる範囲と水分移動を考慮した本モデルを適用すべき範囲を明確にした。

第8章は、各章で得られた結果を取りまとめて結論とした。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Fundamental Study on Effect of Water Movement on Chloride Ion Penetration in Concrete

Name: Kentaro Koike

Recently, Fick's second law is widely used as one of the durability assessment methods of chloride attack in concrete structures due to its simplicity and applicability as a model to estimate the diffusion coefficient of chloride ion.

But in actual environment, adsorption, immobilization, advection of chloride ion due to the capillary water movement due to wet-dry cycles is also broadly regarded as diffusion of chloride ion.

Most of the marine structures located in tidal zone or splash zone undergo repeated wet-dry cycles. So, inclusion of water movement to concentration diffusion is not preferable.

In the current durability assessment method, apparent diffusion coefficient are changed due to factors like water movement and chloride penetration under different environmental conditions even if materials used in RC structures are same. Recently, it is also reported that, in case of concrete highly resistive to chloride penetration, diffusion of chloride stagnates due to restricted water movement which is a solvent for chloride diffusion. Hence this phenomenon cannot be explained by concentration diffusion model. In such case, application of current diffusion model, possibly reduce accuracy of predictions by water movement.

However, there are a few case studies about relationship between water movement in capillary pore and chloride ion movement, mechanism of chloride penetration in actual phenomena is not clear.

Therefore, in this study, we experimentally investigated penetration property of chloride ion into concrete subjected to wet-dry cycles. Based on experimental results, chloride ion penetration model that takes into account the water movement is developed and application range is validated.

This dissertation has following 8 chapters.

Chapter 1 clarifies background and purpose of the dissertation, and shows the composition.

Chapter 2.

Focusing on water as a solvent for chloride ion penetration, water movement phenomena is classified. Literature on several studies regarding water movement model is summarized.

In addition, deterioration mechanism due to chloride attack on RC structures explained. And, chloride ion concentration diffusion model used in the durability assessment of structure by chloride attack is presented and problems associated with this model when considering water movement is discussed.

Chapter 3 discusses chloride ion penetration test carried out using salt water to clarify effects of water movement on penetration property of chloride ion in mortar under absolute dry condition and saturation. Also, effect of water to cement ratio and cement type is considered. Following conclusions are drawn.

- In the case of saturated condition of mortar, penetration profile of chloride ion follows Fick's Law of diffusion.
- On the other hand, in the case of absolute dry condition of mortar, the mortar absorbs water rapidly. From water content profile, water movement includes effect of capillary water movement and water vapor

diffusion. In addition, penetration profile of chloride ion does not follow Fick's Law of diffusion, but corresponded advection-diffusion profile.

- Characteristic of water movement is affected by water to cement ratio and cement types. Especially, in the case of low water to cement ratio and using blast furnace slag or fly ash, water movement and chloride ion penetration is inhibited.
- Also, penetration property is related to pore structure which is affected by water to cement ratio and cement types. And, water movement, chloride penetration, and apparent diffusion coefficient depend on pore structure.

#### Chapter 4.

From experimental result of chapter 3, chloride ion penetration model with water movement is proposed as advection- diffusion model. Following conclusions are drawn.

- In this model, effect of air filled pore could not be evaluated. But, water movement profile (capillary water movement + water vapor diffusion) is clearly identified. Also, water movement restriction confirmed experimentally could be reproduced in analytical model.

#### Chapter 5.

Wet-dry cyclic test were carried out under 3 different conditions (Relative humidity of 30%, 60%, 75%) to clarify characteristic of water movement and penetration property of chloride ion. Following conclusions are drawn.

- Amount of evaporated water increased under low relative humidity during dry condition. In all cases of relative humidity the depth of water evaporated from surface of specimen was up to 3 to 4cm. water evaporation reduces with increase in number of cycles. This phenomena is due to increase in chloride ion penetration with passage of cycles resulting water vapor pressure depression. Hence, relationship between chloride ion content and water evaporation can be established.
- In the absorption phase, water moves to dried area when dry phase changes to absorption phase. Even if water is absorbed, it does not reach saturation state. Water movement is restricted up to 1cm depth, because of air filled capillary pores. But, chloride ion penetration is not restricted, because chloride ion diffuse through alternate water filled connected pores.

#### Chapter 6.

From experimental result of chapter 5, water movement and chloride ion penetration models under wet-dry cyclic condition are proposed.

First, water movement model in dry phase is applied based on previously proposed Akita's model. On the other hand, in absorption phase, chloride ion penetration model based on chapter4 is applied with advection-diffusion model. From the analysis it is confirmed that surface chloride ion concentration increases with passage of cycles.

#### Chapter 7.

Numerical simulation was carried out to clarify application range of proposed model in my study and previously proposed diffusion model.

#### Chapter 8.

The results are consolidated and summarized.