

多様な乾湿条件下におけるコンクリート中の水分塩分連成移動解析

氏名：櫻井優
指導教員：下村匠

1. はじめに

電力洞道は地中の鉄筋コンクリート構造物であり、塩分に起因する鉄筋腐食が維持管理上の課題となっている。特に対象とする洞道は海岸付近に位置し、塩分を含む漏水とケーブルの発熱が複合する特殊環境下にある。塩分調査では側壁下部で塩分濃度が高く、部位により分布が異なる傾向が確認された(図-1)。これは同一面上での吸水・乾燥混在による水分塩分の2次元的な移動に起因すると推察される。そこで本研究は、複雑な乾湿条件下での移動現象を汎用的に評価可能な解析手法の構築を目的とし、プログラムの拡張と室内実験による検証を行う。

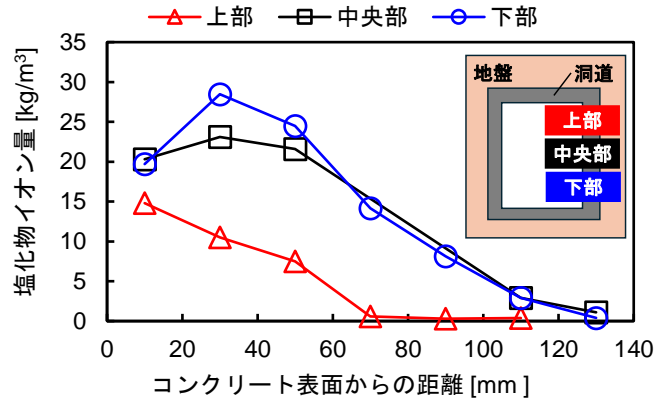


図-1 塩化物イオン量の調査結果

2. 解析手法の構築

2.1. 水分移動モデルの統合と解析プログラムの拡張

既往研究では「乾燥・吸湿」と「吸水」に異なる物理モデルを用いてきたが、同一面上で乾湿が混在する2次元場でのモデル使い分けは困難である。そこで本研究では、Thynn らの知見に基づき、吸水境界を飽水固定とし、かつ液状水移動速度の増大倍率(以下、移動速度 KI)を増大させることで、吸水過程も含めて統一的に拡散方程式で表現する手法を採用した。また、領域全体の移動速度 KI を一様に増大させる Thynn らの手法に対し、本研究では複雑な境界条件に対応するため、吸水領域の深さ D と移動速度 KI を局所的に設定できるようモデルを拡張した。なお、各変数は感度解析および室内実験に基づき同定した。本手法の採用により、物理現象の異なる各過程の統一的な評価が可能となり、2次元解析へ拡張も可能となった。

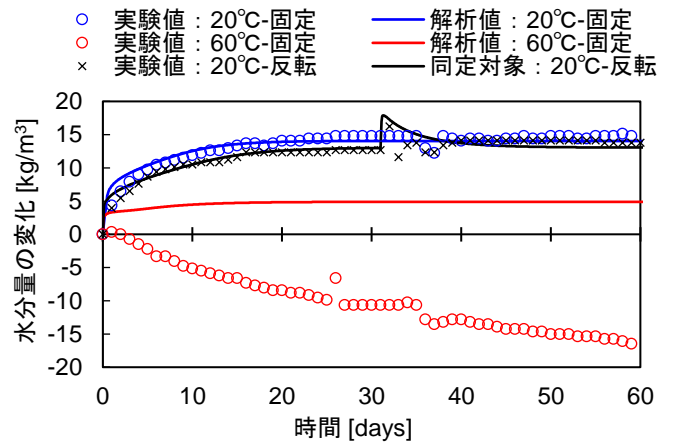


図-2 供試体全体の水分量の経時変化

3. 1次元方向の水分塩分移動に関する実験

3.1. 実験概要

構築した解析手法の妥当性を検証するため、片面吸水・片面乾燥試験を行った。供試体はコンクリートを用い、物質移動を1次元に限定するため側面を被覆した。環境条件は20°C, RH50% (以下20°C環境) および60°C, RH5% (以下60°C環境) とした。境界条件は上面を乾燥とし、下面を NaCl 濃度 3.0% の塩水による吸水とした。また、この状態を維持する「固定ケース」と、30日後に上下を反転させる「反転ケース」を設定した。

3.2. 実験結果

図-2 に各環境における供試体全体の水分量の経時

2.2. 塩分移動モデルとの連成解析手法

塩分移動は既往研究と同様、液相中の濃度拡散と水分移動に伴う移流を考慮して定式化した。解析では、水分移動解析で得られた液状水流束を塩分移動方程式の移流項に代入することで、水分塩分の連成を行う。

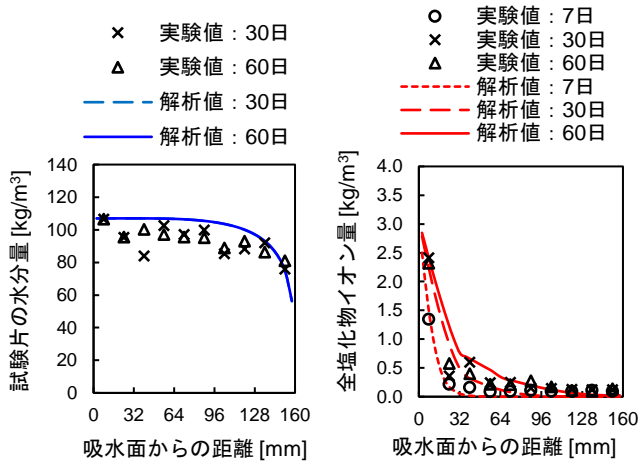


図-3 20°C環境における水分量と塩分量の分布

変化を示す。図-2の実験値より、20°C-固定では吸水が、60°C-固定では乾燥が卓越する傾向を確認した。一方、反転ケースでは両環境ともに反転直後の急激な重量増加が確認された。これは、乾燥により水分逸散した空隙への急速な吸水に起因する。

図-3に20°C環境における水分量と塩分量の分布を示す。図-3の実験値より、20°C-固定の内部分布では、吸水面から乾燥面へ水分勾配の形成と、時間経過に伴う塩分の内部浸透が確認された。

4. 解析手法の1次元実験の再現

4.1. 吸水変数の感度解析と同定

本手法の再現性は吸水領域の深さ D と移動速度 KI に依存するため、20°C-反転を対象に感度解析を行った。設定値は、既往研究を参考に KI を1.0~10.0倍、実験の水分分布形状に基づき D を10~50mmとした。解析の結果、 KI が大きいほど吸水・反転直後の増加速度が増大し、 D が大きいほど吸水容量が増加する傾向を確認した。これに基づき、図-2の20°C-反転の解析値より、20°C-反転の実験結果との残差が最小となるよう、最適な変数 D および KI を同定した。

4.2. 実験結果との比較による妥当性検証

図-2の解析値より、同定変数を用いた水分量経時変化は、20°C環境で実験値と一致したが、60°C環境では乖離が見られた。これは、モデルで考慮した温度依存性を上回る水分逸散が、高温環境下で生じているためと考えられる。一方、図-3の解析値より、経時変化が整合した20°C環境における内部分布では、解析結果が実験値を再現しており、本手法の妥当性が確認された。

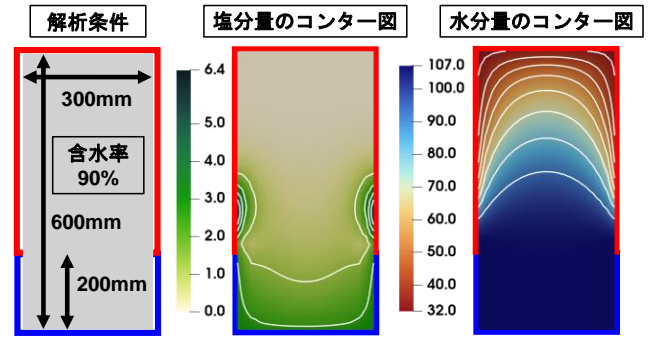


図-4 360日後の塩分量と水分量のコンター図



図-5 洞道側壁部における白色の析出物

5. 2次元解析による物質移動挙動の検討

5.1. 解析対象と条件

20°C環境下にて、初期含水率90%の矩形断面(600×300mm)を解析した。境界条件は底面および高さ200mmまでの側面を吸水面(NaCl濃度3.0%)とし、残る表面を乾燥面(20°C, RH50%)とした。

5.2. 解析結果

図-4に360日後の塩分量と水分量のコンター図を示す。図-4より、水分分布では下部からの吸水と上部からの蒸発により、勾配を持つ2次元分布を形成した。一方、塩分分布は経時的に内部へ浸透し、特に吸水・乾燥境界付近で局所的に高まる濃縮現象が生じた。

これは、毛細管吸水により吸い上げられた塩水が境界部で蒸発し、塩分のみが蓄積したと考えられる。

5.3. 塩分調査結果との比較

図-1より、実地調査における塩分量の高さ方向の分布傾向は、本解析(乾燥面)の結果と整合しており、実現象の再現性が確認された。また、解析上の「塩分濃縮」は、実構造物の吸水・乾燥境界に見られる白色析出物の発生位置(図-5)と対応しており、本手法の

妥当性が示された。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 片面吸水・乾燥や反転等の条件下で実験を行い、解析検証用の詳細データ（全体挙動・内部分布）を取得した。
- 2) 吸水領域の深さにおける移動速度を増大させることで、20°C,RH50%下の水分・塩分挙動を再現した。
- 3) 2次元解析により、吸水面から乾燥面への塩分移動および境界付近での濃縮現象を再現し、実現象との整合性を示した。

[参考文献]

- 1) H. T. Thynn and T. Shimomura : Hybrid computational method for capillary suction and nonsaturated diffusion in concrete, ConMat'09, pp.1075-1080, 2009