

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13813

研究課題名（和文）RC構造物における水分移動を考慮した塩分浸透モデルの構築と設計・維持管理への提案

研究課題名（英文）Building of chloride penetration model considering moisture transfer in RC structures and proposals to design and management.

研究代表者

小池 賢太郎 (Koike, Kentaro)

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：30781992

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：RC構造物における水分移動を考慮した塩分浸透モデルの構築と設計・維持管理への提案を目的として、コンクリート中の水分移動が塩化物イオンの浸透や鋼材腐食へ及ぼす影響を確認した。まず、局所的な水分供給によるコンクリート中の水分移動を供試体中に多点埋設した湿度センサにより2次元的に評価したところ、水分供給箇所から3～5cm程度のごく狭い範囲にて、相対湿度差20%程度の乾湿燥領域が形成されることが確認された。また、鉄筋を埋設したコンクリート供試体にて同様の実験を行ったところ、水分供給箇所にて著しく自然電位が低下する傾向が確認され、給水と非給水部の相対湿度差よりマクロセルを形成していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートにとって「水」は、セメントの水和反応や養生などのより良いコンクリートを作るうえで重要な要因である一方で、塩分浸透や鋼材腐食などの劣化現象においてもまた重要な役割を担っている。橋梁の劣化においても、橋面の排水不良に起因した桁受部や張出床版などの水掛かり部に、剥離、鉄筋露出などの変状が多数報告されており、「水」の影響を軽視できない状況にある。本成果は、コンクリートの水掛かり部における鋼材腐食のリスクやその影響範囲を評価し、橋梁をはじめとする各種構造物の水掛かり部の適切な点検・維持管理手法の提案に繋がる貴重な情報を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：In this study investigated chloride ion penetration and rebar corrosion effect by capillary water movement in concrete to purpose for building of chloride penetration model considering moisture transfer in RC structures and proposals to design and management. In experiment of clarification of water movement in concrete with local water supply, there was humidity difference about 20% in narrow area around 3 to 5cm from local water supply point was confirmed as two-dimensional water movement by a humidity sensor embedded in the specimen. In addition, from result of experiment on same condition by using rebar embedded concrete specimen, self-potential of rebar declined clearly around local water supply point was confirmed. That is, macro-cell corrosion was formed due to drastic humidity difference by local water supply was suggested.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：水分移動 塩分浸透 拡散 移流 水掛かり部 マクロセル

## 様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海洋環境下では多くの鉄筋コンクリート構造物(以下,RC構造物と称す)が供用されており,これらの多くは生活基盤や輸送拠点としてのみならず,防災やエネルギー開発の役割を担っているため,構造物の健全性を保持することは極めて重要な課題である.その一方で,海洋環境下は塩害環境というRC構造物にとって耐久性上極めて厳しい環境下にあるため,塩害劣化を考慮した構造物の設計や維持管理が必要となる.例えば,RC構造物の塩害に対する耐久性設計体系では,構造物の要求性能が塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食によって損なわれないことを十分に照査することを定めている.また,維持管理体系においても同様に,コンクリート中の鉄筋が発錆しない潜伏期の状態,もしくはコンクリート表面に変状が現れない進展期の状態にとどめる維持管理計画とする必要がある.つまり,鉄筋腐食の劣化因子の一つである塩化物イオンの浸透特性を把握することは,RC構造物の塩害の劣化進行過程における潜伏期の長さを適切に推定するうえで極めて重要である.

一般的に,コンクリート中への塩化物イオンの浸透は,コンクリート中での塩化物イオンの移動を,濃度勾配を駆動力とする拡散現象として捉え,Fickの拡散方程式を利用して評価されている.この拡散モデルによる評価手法は,非常に簡便で優れた方法であるが,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,乾湿履歴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見かけの拡散係数に包含されている.しかし実構造物では,飛沫帯や海上大気中,道路橋における融雪剤散布地域のような,乾湿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することにも限界がある.この予測精度の低下は,コンクリート構造物の維持管理において経済性を欠く要因であり,事実,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水分の移動が抑制され,塩化物イオンの浸透が停滞する現象も報告されており,現行の濃度拡散モデルでは,水分移動の影響により予測精度を大きく狂わせる可能性があることが実データとして示されている.そのため今後のRC構造物の維持管理においては,これまでのFickの拡散方程式による一律な評価よりも,構造物の設置環境や部材位置等に合わせて,水分移動の影響を考慮した塩化物イオンの浸透評価手法が必要となってくる.にもかかわらず,コンクリート中の水分移動に伴う塩化物イオンの浸透特性に関して,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ことも事実である.

### 2. 研究の目的

上述したように,コンクリート中の塩化物イオン浸透の影響を考慮することは,RC構造物の維持管理における劣化予測の高精度化,経済性の確保など,効率的な維持管理が可能となる.しかし,コンクリート中の水分移動に伴う塩化物イオンの浸透特性に関して,未だ不明瞭な点が多いことが課題として挙げられる.そこで,本研究では以下の3点を目的として検討を実施する.

#### (1) コンクリート中の水分移動に伴う塩化物イオンの浸透特性の実験的検討

#### (2) 水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルの構築

#### (3) 水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルの設計・維持管理への適用方法の提案

コンクリート中の塩化物イオンの浸透は,コンクリートの塩害が社会問題化された1980年代以降,研究者や技術者らを通じて,数多くの研究成果が提示されてきた.既往の研究の中には,本研究で取り上げる水分移動の影響について,その可能性を言及しているもの少なからず存在するものの,厳密に検証したものは極めて少ない.その一方で,コンクリート中の水分移動に関する研究についても,1970年代から現代に至るまで,多数の研究成果が示されているものの,水分移動そのものに着目しているものが多く,水分移動に伴った物質移動に関する研究事例は少ない.そのため,**本研究の様なコンクリート中の塩化物イオン浸透について,水分移動の影響に着目して,塩化物イオンの浸透予測の高精度化を目指した検討や研究の事例はほとんどない.**

### 3. 研究の方法

橋梁の劣化事例を整理すると,橋面の排水不良等に起因した桁受部や張出床版部等の水掛かり部近傍では,剥離,鉄筋露出等の変状が多数報告されており,局所的に水分供給を受けることで,コンクリート内部で湿度差が生じマクロセルを形成する可能性が示唆されている.そこで,コンクリートの局所的な給水によるコンクリート内部での水分移動,ならびに水分移動が鋼材腐食に及ぼす影響を以下の実験により評価した.

#### (1) 局所的な給水を受けるコンクリートの2次元的水分移動の把握

##### 供試体概要

本研究で用いた供試体は図-1に示す10×10×40cmの角柱供試体とし,配合は表-1に示すW/C=0.5の普通ポルトランドセメントモルタルとした.また,供試体内部の水分状態を計測するためのチタン線を予め埋設しており,埋設間隔は,吸水過程用供試体では吸水部近傍を1cm間隔,それ以外を2cm間隔とし,乾燥過程用供試体では一様に2cm間隔とした.供試体は,2日間の湿潤養生と26日間の気中養生を行った後に,水掛かり部を模擬するための,幅2cmのアクリル水槽を供試体上部に取り付けた.また,供試体内部での水分移動を2次元方向に限定するため,供試体上下面以外にはエポキシ樹脂を塗布した.

試験方法

吸水過程では図 - 1 に示した水槽に給水し、供試体を室温 20 湿度 70%の環境に静置し、281 日目、湿度を 30%に変更した。また、乾燥過程では、吸水過程と同様の方法で供試体を十分吸水させた後に、水槽を取外し室温 20 湿度 70%にて暴露を行った。試験中は、定期的には各チタン線間の電気抵抗 R を測定し、これを相対湿度に換算し供試体内部の水分分布を評価した。

供試体に埋設したチタン線間の電気抵抗を相対湿度に換算するために、電気抵抗率試験により両者の関係を明らかにすることとした。供試体は図 - 1 と同配合にて図 - 2 に示すチタン線を 1cm 間隔に埋設した 4×4×1cm のモルタル供試体とした。供試体は材齢 28 日まで水中養生し、その後、相対湿度 43%、60%、79%、98%に調湿した容器内に供試体を静置して、チタン線間の電気抵抗が定常状態となるまで LCR メータによる測定を行った。また、105 の炉に試験片を静置し、絶乾状態になったものを相対湿度 0%とした。なお、測定した電気抵抗 R から式(a)を用いて比抵抗 を求め評価を行った。

$$R = \{ \log(d/a) / (\pi/l) \} \times \rho \quad \text{式(a)}$$

ここで、a: 電極棒の半径(cm)、d: 電極間隔(cm)、l: 通電部の長さ(cm)である。

(2) 局所的な給水を受けるコンクリート中鋼材の腐食特性の把握

図-3 に供試体概要を示す。寸法 150×150×1200mm の角柱供試体を作製し、内部には主筋として 13 ミがき丸鋼をかぶり 3cm で配筋し、スターラップ筋として 5 ミがき丸鋼を 25cm 間隔で配筋した。表-2 にコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、W/C は 50%である。なお、腐食を促進させるため、予め 5kg/m<sup>3</sup> の塩化物イオン量を練り混ぜ時に外割りで添加した。この供試体を用い、図-3 に示すように透明アクリル製のカバーを設置した。雨水等が掛かる位置は、両端部、中央、はり全面、吸水なし(屋内)の 4 ケースで、屋内以外の供試体は屋上に曝露した。両端部が露出する供試体は端部から 12.5cm 露出させた。また、中央のみの場合ははり上面中央部に 5cm の穴を開けた。試験では水掛りの範囲およびひび割れを目視で観察し、定期的に自然電位の測定を行った。

4. 研究成果

(1) 局所的な給水を受けるコンクリートの 2 次元的水分移動の把握

電気抵抗率試験により得られた相対湿度 H と比抵抗 の関係を図-4 に示す。これより、各測定結果の線形近似を取ると以下の式(b)が得られたため、後述の吸水過程、乾燥過程の透水試験において式(b)を用いた。

$$H = -12.4 \ln(\rho) + 128.86 \quad \text{式(b)}$$

表 - 1 配合表 1

	W/C	ペースト容積比	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )		
			W	C	S
OPC	0.5	0.459	275	550	1400

表-2 配合表 2

	W/C(%)	内在塩	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
OPC	50	5	175	350	774	991

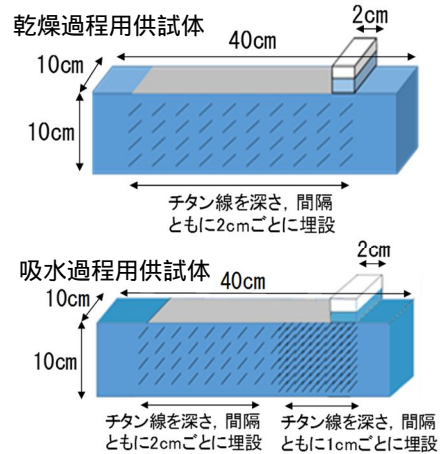


図 - 1 供試体概要

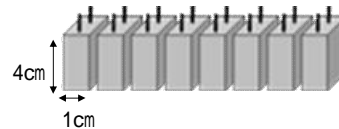


図 - 2 電気抵抗率試験用供試体概要

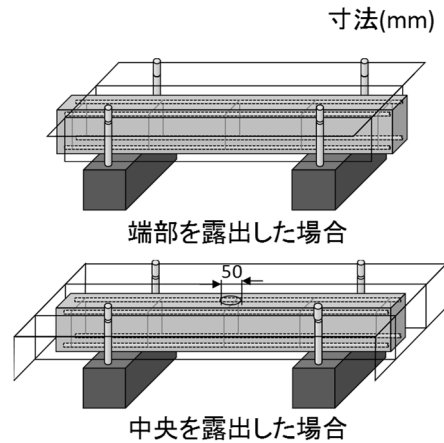


図-3 供試体概要

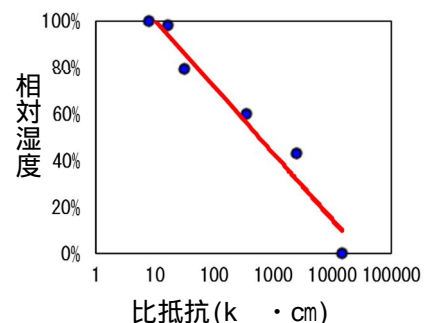


図 - 4 比抵抗と相対湿度の関係

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 ( 共通 )

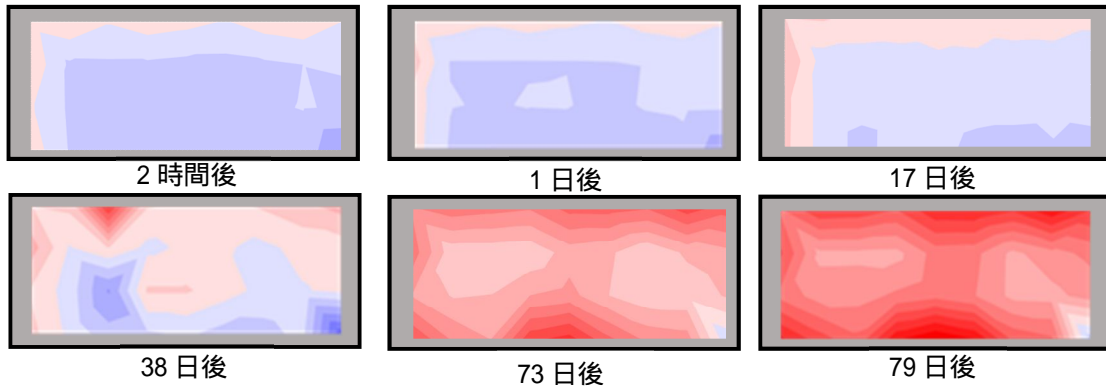
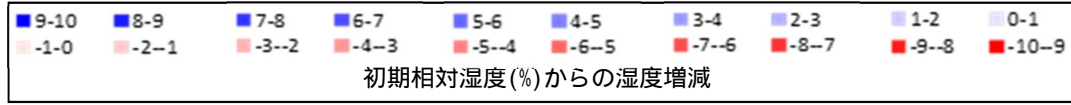


図 - 5 乾燥過程における初期からの湿度増減

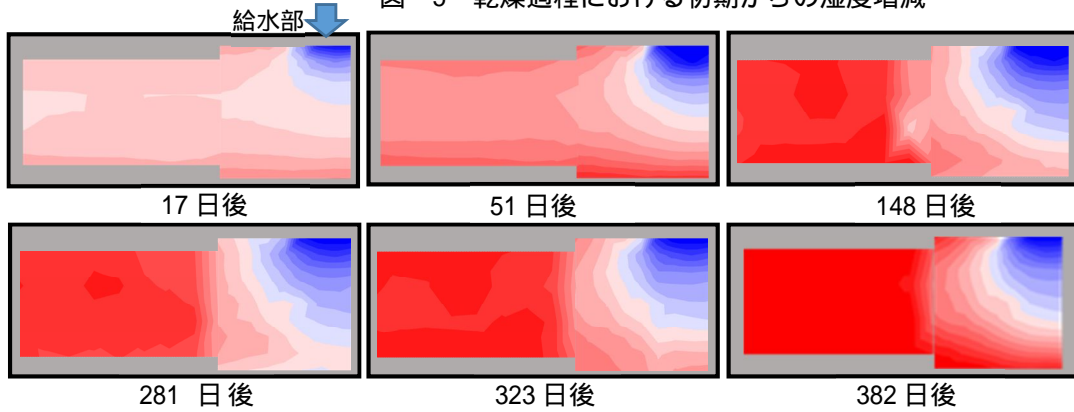


図 - 6 吸水過程における初期からの湿度増減

乾燥過程

図 - 4 に乾燥試験における供試体内部の相対湿度分布の初期状態からの増減を示す。試験開始直後から供試体上面 1cm 程度まで相対湿度が減少し乾燥が進んでいることが確認できる。上面から乾燥の影響を受け乾燥域が下に広がっていく様子が見られる。ただし供試体下面も開放されていることから、徐々に乾燥が進み試験開始 73 日目以降は全体的に乾燥領域となっていることが確認された。

吸水過程

図 - 5 に吸水過程における供試体内部の相対湿度分布の初期状態からの増減を示す。試験開始直後から、給水部直下からの相対湿度が増加しており、水の浸透が拡大していることが確認できる。一方で、それ以外の領域では相対湿度が減少し乾燥が進んでいることが確認できる。281 日目では、深さ 8cm、給水部からの距離 7cm 程度の深さまで水が浸透した。その後、湿度を変更するとその浸透範囲が深さ 5cm、給水部からの距離 5cm まで減少し、乾燥の影響も受けている様子が見られた。このように局所的な吸水は供試体の奥に行き渡ることなく、供試体内で大きな湿度差を生む。この湿度差がマクロセル腐食を生じさせる可能性がある。また 281 日目と 382 日目を比べると湿度の遷移範囲が狭まっており、より厳しい環境になっていることが伺える。

(2) 局所的な給水を受けるコンクリート中鋼材の腐食特性の把握

図-7 に結果の一例として曝露 40 日における供試体の自然電位分布を示す。端部露出供試体と中央露出供試体では、いずれのグラフにおいても時間の経過に伴い水掛かり部の自然電位が卑化した。また、その自然電位は腐食判定値である -350mV vs CSE よりも卑な値を示した。4.(1)の結果より、水掛かり部は深さおよび水平方向に 3~5cm 程度の範囲において高湿度環境になっていることが想定され、本試験も同様に水掛かり部の吸水により鉄筋表面の環境が局所的に変化したものと推察される。

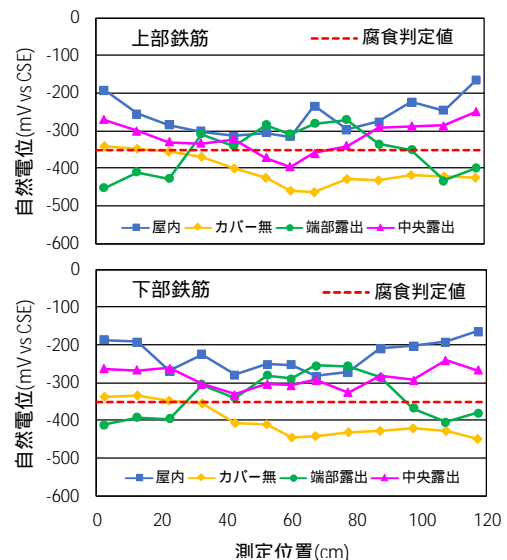


図-7 曝露 40 日における自然電位

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kentaro Koike	4. 巻 1
2. 論文標題 Analytical Evaluation of Chloride Ion Penetration with Effect of Capillary Water Movement in Concrete	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 8th International Conference of Asian Concrete Federation	6. 最初と最後の頁 569-578
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kentaro Koike
2. 発表標題 Analytical Evaluation of Chloride Ion Penetration with Effect of Capillary Water Movement in Concrete
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Concrete Federation（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考