

論文 乾湿繰返しを受けるモルタル内部の乾湿挙動と内部鋼材の腐食速度

齊藤 亮介*1・崎原 康平*2・松沢 晃一*3・高谷 哲*4

要旨: 本稿では「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会」の活動の一環として、乾湿繰返しを受けるモルタル中の乾湿挙動について研究した成果を報告する。塩分濃度の異なるモルタル試験体に対して JCI-SC3 の条件で乾湿繰返しを与え、内部相対湿度の挙動と埋設した鋼材の腐食状況から、内部の乾湿挙動と酸素供給について評価した。その結果、かぶり 10mm では乾燥と湿潤を繰返すが、30mm 以深では湿潤状態が継続すること、塩分を含む場合にインピーダンス計測から腐食速度が大きいと判定されたとしても、内部が湿潤状態であれば酸素供給が遮断されるため腐食速度は小さいことを示した。

キーワード: 腐食, 乾湿繰返し, 内部相対湿度, 塩分, 電気化学, インピーダンス

1. はじめに

著者らは「JCI-TC222A コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会 (委員長: 高谷哲)」の活動の一環として、コンクリートが乾湿繰返しを受けた際の内部の乾湿挙動と腐食との関係を実験により調査した。実環境においてコンクリート部材がおかれる環境は、湿潤環境、乾燥環境、乾湿繰返し環境に大別され、この中で乾湿繰返し環境において腐食速度が大きくなることわかっている¹⁾。これは、乾燥と湿潤を受ける過程で、腐食因子である水と酸素の双方が鉄筋周囲に供給されるためである。一方で、コンクリートは一旦湿潤状態になると、内部まで乾燥が進むには時間を要す²⁾ため、乾燥を受ける期間が短い場合は、コンクリートの表層部のみで乾湿が繰返され、内部は湿潤状態を維持すると考えられる。そのため、コンクリートの外部環境が乾湿繰返しの場合に、必ずしも腐食速度が大きいわけではなく、鉄筋周囲のコンクリートが乾燥と湿潤を繰返す条件が揃うことで初めて腐食速度が大きくなる。この乾湿挙動は、塩分の影響を受け、塩分を含む場合にはコンクリートから水分の蒸発が進みにくい^{2),3)}ことや、吸湿速度が速い⁴⁾ことが報告されている。コンクリートが乾湿繰返しを受けた際の塩分浸透挙動については多くの研究事例があるが^(例えば5),6)、コンクリート内部の乾湿挙動および鋼材の腐食速度に対する塩分の影響については不明な点が多い。

そこで本研究では、含有する塩分濃度の異なるモルタル試験体に対して JCI-SC3 「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—」の条件で乾湿繰返しを与え、内部相対湿度の挙動と埋設した鋼材の腐食状況から、モルタル内部の乾湿挙動の把握を試みた。

2. 実験方法

2.1 試験体概要

モルタル中に温湿度センサと電気化学計測用の鋼材電極を埋設したものを試験体とした。試験体の寸法は 250mm×250mm×120mm で、250mm×250mm の面を打設面として、かぶり 10mm, 30mm, 50mm の3つの深さに温湿度センサおよび鋼材電極をそれぞれ埋設した。その際、センサの計測部と試験体端部の距離が 50mm 以上となるように配置した。鋼材電極は、φ16mm の SS400 鋼材 (評価面積 2.0cm²) をエポキシ包埋したもので、モルタルの打込み直前に評価面を研磨した後、型枠内に固定した。試験体の概要を図-1 に示す。

使用したモルタルの配 (調) 合を表-1 に示す。全ての配 (調) 合についてモルタルの溶液/セメント比を 50% とし、塩分を含む条件については、NaCl 試薬を上水道水に溶解した塩水を練混ぜ水として使用した。また、ブリーディングの影響をなるべく排除するため、モルタルは注水から 3 時間程度経過してブリーディング水の上昇が概ね終了した時点で型枠内に打ち込んだ。打込み後は材齢 28 日まで 20℃環境下で封かん養生を行った後、打設面を除く 5 面をシールして試験に供した。

試験体はモルタルの配 (調) 合 3 水準に対して 3 体ずつ、計 9 体用意した。以降、試験体の呼称は塩分濃度に対応させ、0kg/m³ の場合は CI-0, 3kg/m³ の場合は CI-3 として表記する。それぞれの試験体に対して上述の深さで温湿度センサおよび鋼材電極を設置しており、同条件の測定点数は 3 点である。

2.2 測定条件

(1) モルタル内部の温湿度

モルタルに埋設したセンサには、コンクリートの養生管理等を目的に使用されるワイヤレス型の製品を使用し

*1 清水建設 (株) 技術研究所 建設基盤技術センター 研究員 (正会員)

*2 琉球大学 工学部工学科建築学コース准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 国立研究開発法人 建築研究所 材料研究グループ 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士 (工学) (正会員)

た。測定精度は、温度については±1°C、相対湿度については20～80%RHの範囲において±2%、それ以外の範囲では±3%である。測定間隔はバッテリー寿命と実験期間を考慮して2時間とした。

(2) 電気化学測定

打設面に80mm×80mmのSUS304板(対極)と鉛照合電極(参照極)を接触させ、埋設した電極を作用極とした3電極系でインピーダンス計測を実施した。計測は、封かん養生終了時を初期値とし、その後は2.3節に示す乾湿サイクルの5または10サイクルの湿潤過程終了時にそれぞれ実施した。湿潤過程終了時を選択したのは、計測時のモルタルの抵抗を小さくするためである。

周波数範囲は100kHz~10MHz、AC振幅はかぶり10mmの計測時のみ20mVとし、それ以外は全て50mVとした。これは、かぶりが大きい場合にモルタルの抵抗が高くなり20mVでは良好なインピーダンススペクトルが得られない可能性を懸念したためである。また、対極および参照極とモルタルの接触抵抗を低減させるため、初期値の計測時には打設面を含むウエスで覆い、その後の計測では乾湿サイクル以外からの給水を防ぐため導電性を持つ親水性高分子ゲルシートをモルタル面に貼り付けた。

2.3 乾湿繰返し条件

JCI-SC3に準拠し、65°Cかつ98%RHの環境下に3日間存置して吸湿させる湿潤過程と、12.5°Cかつ60%RHの環境下に4日間存置する乾燥過程を、恒温恒湿槽内に存置した試験体に与えた。その際、槽内の湿度調整は、湿潤過程では恒温恒湿槽の加湿機能により行い、乾燥過程ではシリカゲルを配置して行った。インピーダンスの初期値計測が完了した材齢32日時点から湿潤過程の温湿度条件で10日間の前養生をした後、乾燥過程から乾湿サイクルを開始した。サイクル数は、CI-0では10サイクル、CI-3とCI-10では5サイクルとした。

2.4 塩化物イオン濃度の測定

5サイクル経過後のインピーダンス計測の後、CI-3とCI-10の試験体から1体を選択し、φ45mmのコアを採取した。一部の試験体において試験過程でひび割れが確認されたため、コアの採取位置は試験体中央部にてひび割れの発生していない箇所から選定した。採取したコアは、厚み10mm毎にダイヤモンドカッターで円盤状に湿式切断した後、JIS A 1154に準拠して電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を測定した。測定位置は、かぶり0-10mm、10-20mm、20-30mm、30-40mm、40-50mmの5か所とした。なお、モルタルの打込みに際して練返しを行ったため単位容積質量を取得できていない。そのため、塩化物イオン濃度の算出には、コンクリートの単位容積質量として一般的に使用される2300kg/m³を参考値として使用した。

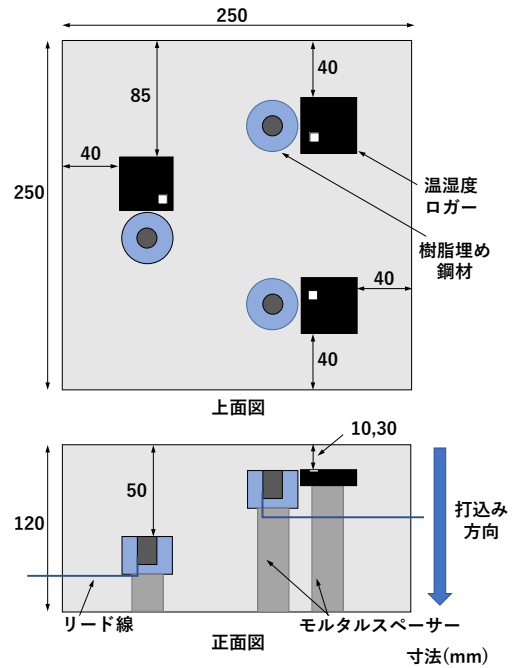


図-1 試験体の概要図

表-1 使用したモルタルの配(調)合

溶液/セメント比	単位量			
	W	C	S	Cl ⁻
	(kg/m ³)			
0.5	256	512	1536	0, 3, 10

W: 上水道水または塩水
 C: 普通ポルトランドセメント 密度3.14g/cm³
 S: 混合砂(山砂: 砕砂=7:3) 表乾密度2.64g/cm³
 Cl⁻: 塩化物イオン濃度 NaCl 試薬で添加

2.5 腐食状態の確認

コア採取後、試験体を割裂して鋼材電極を取り出し、腐食状態を確認した。

3. 結果と考察

3.1 ひび割れ発生

前養生直後、一部の試験体表面にひび割れ発生を確認した。温度上昇によってモルタルが膨張する一方、埋設した電極とセンサによって周囲のモルタルが拘束されたためにひび割れが発生したと考えられる。

3.2 封かん養生中のモルタルの内部温湿度変化

各水準の内部相対湿度変化を、試験体3体から得た平均値を用いて図-2に示す。先述のひび割れの影響を含むことが懸念されたが、打設面のひび割れ有無にかかわらず、相対湿度値の変化傾向は同様であったことから、平均値を用いて議論して良いと判断した。また、乾湿サイクルの途中で故障したセンサがあり、全ての水準でデータ点数は一致していない。特にCI-10のかぶり30mmは、材齢70日時点で全てのセンサが故障したため、5サ

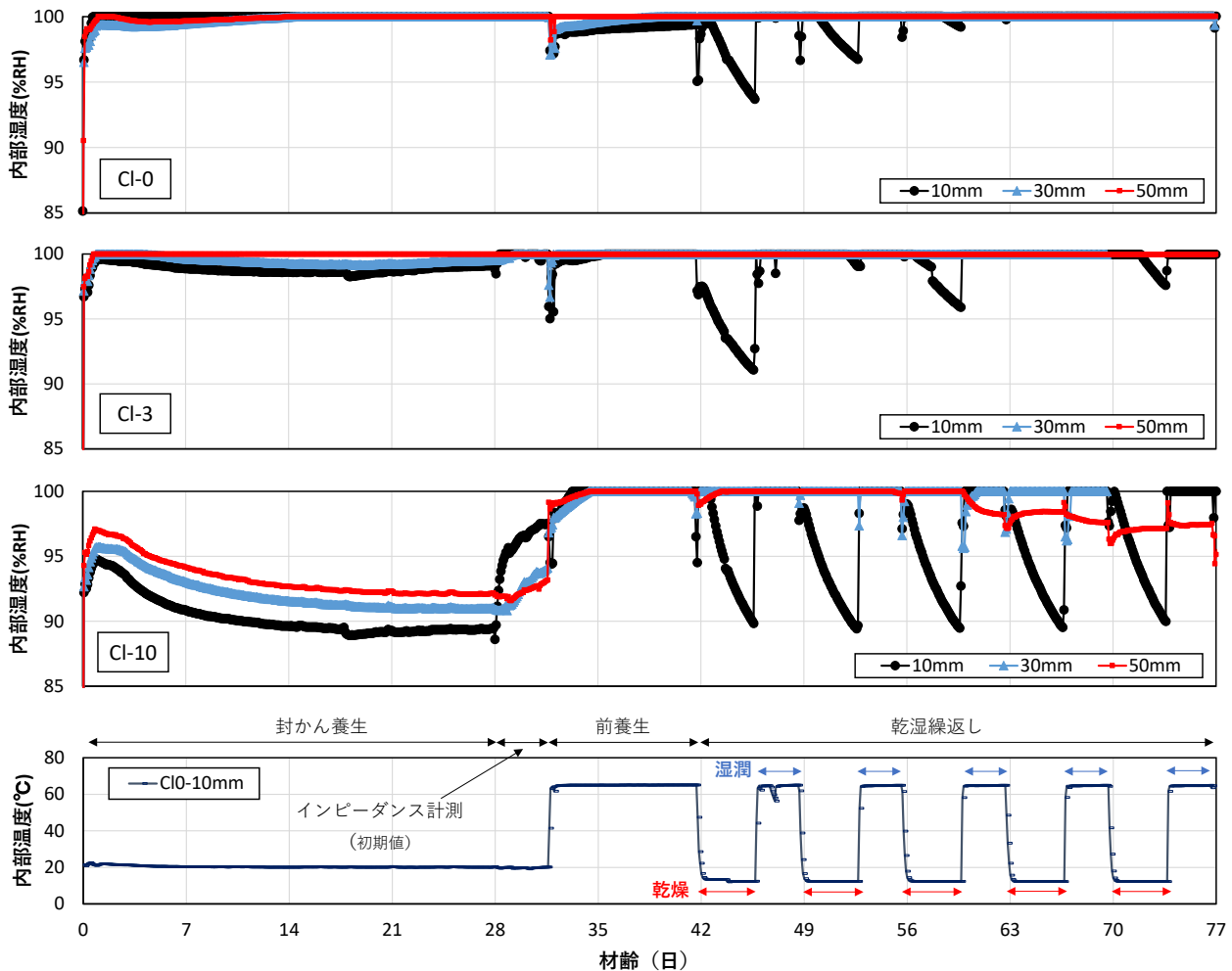


図-2 乾湿繰返し5サイクルまでの内部湿度の変化

イクル目の乾燥過程以降の値が取得できていない。その他、図-2には、CI-0 かぶり 10mm の内部湿度の結果を代表値として併せて示した。内部湿度の変化傾向は全ての試験体で同一であった。

封かん養生中の内部相対湿度は、塩分を含まない CI-0 では概ね 100%RH を示したが、塩分を含む CI-3 と CI-10 では 100%RH を下回り、その値は塩分濃度が高いほど小さくなった。100%RH を下回った原因は、モルタル中の液状水が塩分を含む場合に、塩分を含まない場合よりも飽和水蒸気圧が低くなり、気液平衡となる際の相対湿度（平衡相対湿度）が低下するためである。また、一旦上昇した相対湿度が材齢の経過で低下したのは、水和反応によって水が消費され、液相中の塩水濃度が高まったためと考えられる。

ここで、塩分を含む場合と含まない場合とに分け、相対湿度の変動と乾燥の考え方を整理する。一般に、空間内に液相と気相とが存在し、液相に塩分が含まれない場合、平衡相対湿度は 100%RH である。乾燥によって液相が失われると、相対湿度値は 100%RH を下回る。反対に、液相に塩分が含まれる場合は、塩水濃度に応じて飽和水

蒸気圧が低下するため、液相が存在しても空間内の相対湿度は 100%RH を下回る。液相が消失するには、NaCl の臨界相対湿度 (20°C の場合、78%RH) ⁷⁾以下まで相対湿度が低下する必要がある。

次に、試験体に埋設した温湿度センサの計測部が接する空隙を考える。乾燥を受ける際、塩分の有無にかかわらず、空隙内の液相が減少すると、減少した液相の体積分だけ酸素を含む空気を取り込むことができる。塩分を含まない場合、その空隙中に少しでも液相が存在すると相対湿度値が 100%RH を示し、乾燥によって空隙中の液相が消失すると相対湿度値は 100%RH を下回る。一方で、塩分を含む場合は相対湿度値が 100%RH を下回っても空隙内部には液相が存在できる。すなわち、計測値が 100%RH 以下である場合に、同じ相対湿度の値を示しても塩分を含む方が内部に残存する液相の分だけ、塩分を含まない場合に比べて酸素が供給されにくい環境となる。

3.3 封かん養生以降のモルタルの内部温湿度変化

封かん養生終了後、CI-3 および CI-10 において相対湿度の増加が確認できるが、これはインピーダンス初期値の計測を実施した際に打設面をウエスで濡らしたためで

ある。さらにその後の前養生を経て CI-3 と CI-10 の試験体内部の相対湿度は 100%RH に到達し、すべての試験体で概ね同等の値から乾湿繰返しサイクルを開始した。

乾湿サイクル開始後における相対湿度の変化傾向をかぶり毎に整理する。かぶり 10mm では、塩分濃度にかかわらず乾燥過程において徐々に相対湿度が低下した。再び湿潤過程に移行すると数時間の内に 100%RH に戻った。乾燥過程において、塩分濃度が高いほど相対湿度の低下幅が大きい理由は、養生期間中の相対湿度の変化傾向と同様に、塩分濃度の増加に伴う飽和水蒸気圧の低下であると考えられる。また、サイクル数を経ると、CI-0 と CI-3 では相対湿度低下が起きづらく（液状水が蒸発しづらく）なったが、CI-10 ではそのような変化が見られなかった。本実験では、この現象の原因特定に至らなかった。

かぶり 30mm 以深については、CI-0 と CI-3 では乾燥過程でも 100%RH のままであったのに対し、CI-10 では相対湿度に変化が生じた。特にかぶり 50mm では、3 サイクル以降は湿潤過程においても相対湿度は 100%RH を下回っていた。CI-10 の 50mm については乾燥が疑われるものの、CI-0 と CI-3 の結果から、JCI-SC3 の乾湿繰返し条件では、かぶり 30mm よりも深い位置において乾湿繰返しが起きにくいものと推察される。本来、塩分濃度が高い CI-10 は CI-3 よりも乾燥しづらく、吸湿速度は速いため、乾湿繰返しが生じにくいはずであるが、そうならない原因として、ひび割れの影響が考えられる。同じ CI-10 において、かぶり 30mm よりも 50mm では湿潤過程等で明らかに相対湿度が低下していることから、かぶり 50mm の測定位置にひび割れが到達していた可能性が高いと考えられる。ただし、本実験ではひび割れの制御ができていないため、この点については今後検証する必要がある。

相対湿度変化の傾向から、各塩分濃度について、内部環境を考察し、次に示す。また、相対湿度の変化から想定される鋼材への酸素供給について表-2 に整理した。

(1) CI-0

かぶり 10mm では、乾燥過程において相対湿度が 100%RH を下回っており計測部の空隙に液相が存在せず、酸素供給が生じる。かぶり 30mm 以深では常時 100%RH を維持し、酸素供給が抑制される。

(2) CI-3

CI-0 と同様に、かぶり 10mm では、乾燥過程において相対湿度が 100%RH を下回っており酸素供給が生じる。かぶり 30mm 以深では、常に 100%RH の状態が継続しており酸素供給は抑制される。

(3) CI-10

かぶり 10mm では、乾燥過程において相対湿度が

表-2 湿度変化から想定される鋼材への酸素供給

水準	評価項目	かぶり (mm)		
		10	30	50
CI-0	湿度	乾湿	湿	湿
	酸素供給	○	×	×
CI-3	湿度	乾湿	湿	湿
	酸素供給	○	×	×
CI-10	湿度	乾湿	乾湿	乾湿
	酸素供給	○	△	○

○：酸素供給あり
△：酸素供給はあるが比較的少ない
×：酸素供給ほとんどなし

100%RH を下回っており酸素供給が生じる。かぶり 30mm では、ほとんどの期間で 100%RH を示しているが、乾湿の移行時に相対湿度の低下が見られることから乾燥を受け、少なからず酸素供給はあったと考えられる。かぶり 50mm でも乾燥によって酸素供給が生じるが、これはひび割れの影響を受けた可能性が高い。

3.4 サイクル経過によるインピーダンスの変化

全ての塩分濃度について、インピーダンス計測結果を図-3 に示す。凡例の 10mm はかぶり位置、0cycle は初期値、5cycle あるいは 10cycle はそれぞれ所定の乾湿サイクル終了時の結果である。腐食速度の評価には、低周波数帯のインピーダンス値と高周波数帯のインピーダンス値の差分から分極抵抗を算出する方法が一般的であるが、本実験における高周波数帯のサイクル経過によるインピーダンスの変化量は、低周波数帯から得られるインピーダンスに対して十分に小さいため、低周波数帯の比較のみで腐食状況を評価した。

CI-0 では、初期値に比べて、10 サイクル経過後の低周波数帯のインピーダンスが増加していた。塩分を含まないことからモルタル内部は腐食環境ではなく、そのため初期値の計測時点で鋼材は不動態化しており、その状態が 10 サイクル経過時まで維持していたと考えられる。CI-3 では、かぶり 10mm と 30mm にて、5 サイクル経過によって鋼材の脱不動態化によると考えられるインピーダンス低下が生じた。一方、かぶり 50mm では塩分環境下にあっても高インピーダンスを維持していた。これは、かぶり 50mm では、かぶり 10mm と 30mm に比べて塩化物イオン濃度が小さいためであるが、その詳細は 3.5 節にて述べる。CI-10 では、5 サイクル経過によって全てのかぶりにおいて顕著にインピーダンスが低下していた。

3.5 塩化物イオン濃度の分布

全塩化物イオン濃度の計測結果を図-4 に示す。図中のかぶりの表記はサンプルの中心位置とし、例えば 0-10mm のサンプルでは 5mm とした。

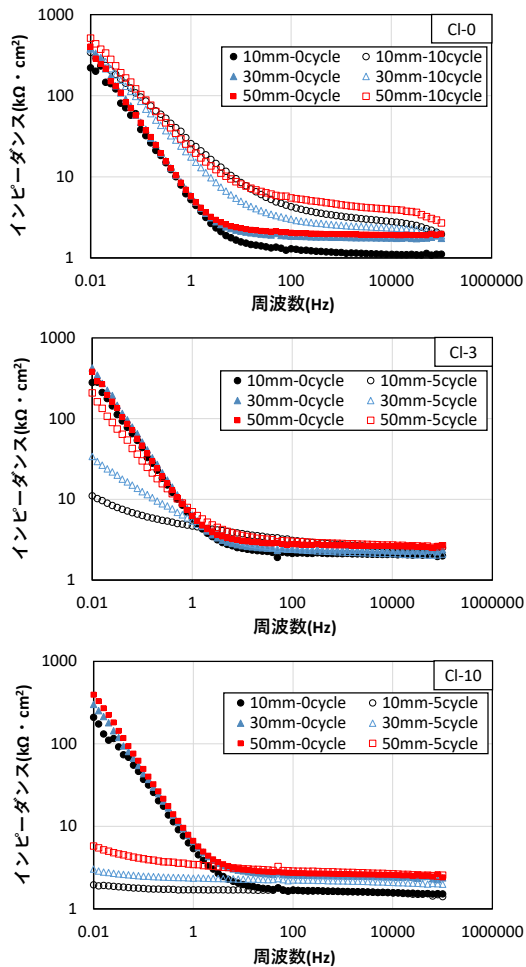


図-3 乾湿サイクル経過前後のインピーダンス計測結果の比較

CI-3 では、かぶり 5mm と 45mm の全塩化物イオン濃度は、それぞれ 5.4kg/m³ と 1.7kg/m³ であり、乾燥面に近い部分の塩分濃度が高く、内部の塩分濃度が小さくなる傾向を示した。土木学会のコンクリート標準示方書によれば、水セメント比 50% のコンクリートの場合、鋼材腐食限界塩化物イオン濃度は、1.90kg/m³ と算出される⁸⁾。セメント水和物による塩分固定等から、コンクリートに比べて単位セメント量の大きいモルタルでは、鋼材腐食限界塩化物イオン濃度はさらに大きいと想定される。図-3において、CI-3 のかぶり 50mm にて 5 サイクル経過も高インピーダンスを維持した理由は、鋼材周囲の塩分濃度が腐食限界濃度より小さくなり、CI-0 と同様に鋼材面が不動態化したためと考えられる。一方、CI-10 では採取位置による塩化物イオン濃度の偏りは生じなかった。ただし、CI-10 の結果は、練混ぜ時に添加した 10kg/m³ よりも幾分大きな値であった。この理由として、算出に使用した単位容積質量が実際の値よりも大きかったことが考えられる。

CI-3 で生じた塩分濃度の分布は、乾燥によって濃度が増加する表面部分と内部の塩分濃度差を駆動力とした浸

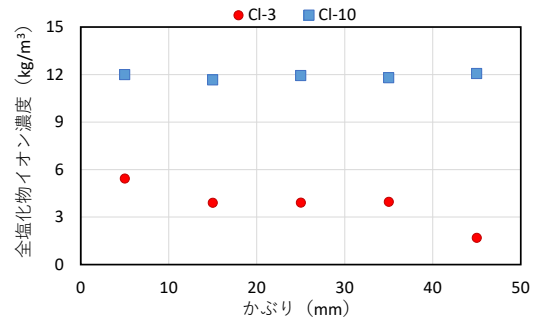


図-4 乾湿サイクル経過後のモルタル内部の塩化物イオン濃度分布

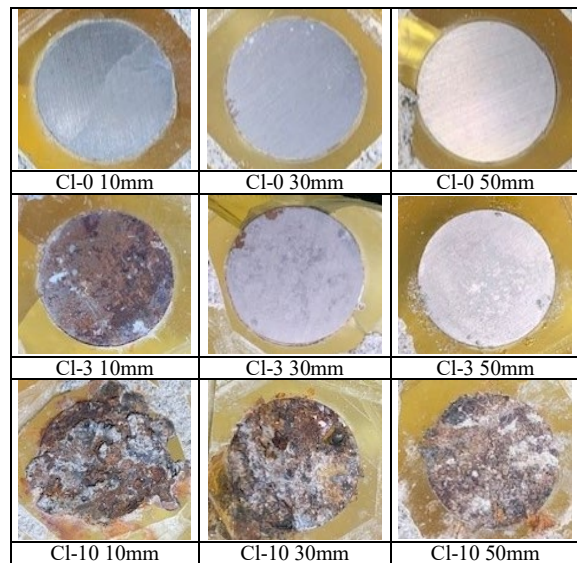


図-5 鋼材の腐食状況

透圧の作用によって説明ができる²⁾。すなわち、乾燥が優先的に進行する表層では、そうではない内部に比べて塩分濃度が高まる。この濃度差を解消しようと、内部では浸透圧がはたらき液状水が表面に移動する。移動する液状水はいくらか塩分を含んでおり、移動した分だけ元の内部の塩分濃度が小さくなったと考えられる。CI-10 では乾燥前の塩分濃度が高いため、表層と内部の塩分濃度差が生じにくい。そのため発生する浸透圧が CI-3 に比べて小さく、水分移動が生じにくいと推察される。

3.6 鋼材の腐食状況

試験終了後の鋼材の腐食状況を図-5 に示す。CI-0 では全てのかぶり位置で鋼材は腐食していなかった。これは、3.4 節で示したとおり、鋼材面が不動態化していたためである。

CI-3 では、かぶり 10mm で薄い腐食層が全面に生じた。腐食の程度は CI-10 よりも軽度で、酸素供給は CI-10 のかぶり 10mm に比べて少なかったことがわかる。次に、CI-3 のかぶり 30mm では端部がわずかに腐食していた。図-3 に示したインピーダンス低下からは腐食速度が大きいと判定されるが、その結果は端部の腐食箇所を反映

したものであり、鋼材面全体では腐食速度は小さい。これは、表-2 のとおり、反応に必要な酸素が供給されなかったためである。かぶり 50mm は CI-0 と同様に不動態化しているため腐食していない。

一方、CI-10 では全ての位置で全面腐食を生じ、層状さびが形成していた。層状さびは乾湿繰返し環境で形成される特徴的なさびりであることから、全てのかぶり位置で乾湿繰返しが生じていたことがわかる。

インピーダンスの計測結果と鋼材の腐食状況から想定される内部環境は、表-3 のように整理できる。なお、高インピーダンスを示した CI-0 のかぶり 10mm, 30mm, 50mm と CI-3 のかぶり 50mm は、鋼材面が不動態化しているため、酸素供給の議論が難しく（酸素が供給されても腐食しない）除外した。判定結果は、概ね表-2 と対応した。特徴的なのは、CI-3 のかぶり 10mm と 30mm との差であり、モルタルが塩分を含み、外部から乾湿繰返し作用を受ける場合において、鋼材近傍が受ける乾燥の程度によって空隙内への酸素供給量が異なり、乾燥しにくい場合には腐食速度は小さくなることが示された。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) モルタル中の塩分濃度にかかわらず、JCI-SC3 の乾湿繰返し条件下において、かぶり 10mm では内部相対湿度が変動しており、乾湿繰返しが生じることを確認した。さらに、その際の相対湿度の低下幅は、塩分濃度が高いほど、大きくなることを示した。
- (2) かぶりが 30mm より深い位置では、JCI-SC3 の乾湿繰返し条件では乾燥が十分ではなく、乾湿繰返しが起きにくいと考えられた。
- (3) CI-3 のかぶり 30mm の結果に示されるように、モルタルが塩分を含む場合は、インピーダンス計測から内部鋼材の腐食速度が大きいと判定されたとしても、内部が湿潤状態であれば酸素が遮断されるため、腐食進行は抑制された。
- (4) CI-3 では、乾湿繰返しを受けることで乾燥が進みやすい表層部の塩化物イオン濃度が高くなり、反対に内部の塩化物イオン濃度は低下した。CI-10 のように初期の塩分濃度が高い場合は、表層と内部で塩化物イオン濃度差は生じなかった。

謝辞

本研究は、JCI-TC222A「コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会（委員長：高谷哲）」の一環として実施したものである。関係者各位に深く感謝いたします。

表-3 インピーダンスと腐食状況から想定される鋼材への酸素供給

水準	評価項目	かぶり (mm)		
		10	30	50
CI-0	インピーダンス	高	高	高
	腐食状況	無	無	無
	酸素供給			
CI-3	インピーダンス	低	低	高
	腐食状況	軽度の全面腐食	端部でわずかに腐食	無
	酸素供給	△	×	
CI-10	インピーダンス	低	低	低
	腐食状況	層状さび	層状さび	層状さび
	酸素供給	○	○	○

○：酸素供給あり
△：酸素供給があるが比較的少ない
×：酸素供給ほとんどなし

参考文献

- 1) 高谷 哲, 奥野翔矢, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章: アルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, Vol.66, No.8, pp.545~552, 2017
- 2) 左藤眞市, 川上圭司, 齊藤亮介, 高谷 哲: 鉄筋の腐食環境としてのコンクリート内の湿度挙動とぬれ特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.773-778, 2020.7
- 3) 原田健二, 佐藤駿介, 下村 匠: 塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.745-750, 2015
- 4) 原田健二, 下村 匠: 塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の解明とそのモデル化, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.4, pp.427-439, 2016
- 5) 小池賢太郎, 山口明神, 武若耕司, 福重耕平: 移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.904-909, 2014
- 6) 金子 樹, 阿部道彦: 乾湿繰返しによるコンクリートの吸水性状と塩化物イオンの浸透・拡散に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.702, pp.1073-1079, 2014
- 7) Tomashov, N. D.: Theory of Corrosion and Protection of Metals, Macmillan, pp.367-375, 1966
- 8) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2023.3