

論文 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測

横田 優^{*1}・佐々木 孝彦^{*2}・飯島 亨^{*3}・松島 学^{*4}

要旨:濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液を上面に貯留した鉄筋コンクリート供試体の 4 年間余の屋外暴露実験を行い、塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の劣化予測に不可欠な項目について検討した。その結果、①腐食発生限界塩化物イオン濃度は $0.14 \sim 1.8 \text{ kg/m}^3$ であること、②単位腐食面積当りの腐食量が 180 mg/cm^2 くらいになると、鉄筋とコンクリート界面にひび割れが発生すること、③年間を通じての鉄筋の腐食速度は気温により変動し夏場は冬場の約 4 倍速く、ひび割れ発生後の腐食速度は発生前の約 3 倍に増大することが分かった。

キーワード: 塩害, 腐食発生限界濃度, 腐食速度, ひび割れ発生腐食量, 温度, 分極抵抗

1. はじめに

塩害とは塩化物イオンに起因する鉄筋腐食によりコンクリート構造物が早期に劣化する現象である。劣化進行過程は、鋼材の腐食が開始するまでの潜伏期、腐食開始から腐食ひび割れ発生までの進展期、腐食ひび割れの影響で腐食速度が大幅に増大する加速期、鋼材の大幅な断面減少などにより耐荷力等の性能が大幅に低下する劣化期という四つの期間に区分される。劣化進行予測とはそれぞれの期間を求めることであり、各期間を決定する要因とその進行速度および閾値をもとに予測する方法がコンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾に示されている。潜伏期を決定する要因は塩化物イオンの拡散であり、終わりは鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度(閾値)を越えたときである。進展期を決定する要因は鋼材の腐食速度であり、終わりは腐食量がひび割れ発生腐食量(閾値)を越えたときである。したがって、各期間を決定する要因および閾値に採用する値により、各期間の長さの予測結果は大きく異なることになる。

本論文は上面に塩化ナトリウム水溶液を溜め

た鉄筋コンクリート供試体の 4 年間余りに及ぶ屋外暴露実験から、塩害を受けるコンクリート構造物の潜伏期や進展期の劣化予測に必要不可欠な腐食発生限界塩化物イオン濃度、ひび割れ発生腐食量、ならびにひび割れ発生前後の鉄筋の腐食速度等について検討した結果を述べるものである。

2. 各期間を決定する要因と閾値の考え方

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法は、建設当初から最終段階までを潜伏期、進展期、加速期、劣化期の四つに区分し、各期間を決定する要因とその進行速度および閾値をもとに予測する方法がコンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾に示されている。

潜伏期の長さは、かぶりと塩化物イオンの拡散係数等が与えられれば、かぶり位置における全塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度を越える時期として算出できる。この腐食発生限界濃度はコンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾では 1.2 kg/m^3 と記されているが、さまざまな機関で検討されて $1.2 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ の値³⁾が提唱されている。これらの値はいずれも鉄筋を埋設し塩化

*1 ㈱四国総合研究所 土木技術部 主席研究員 工博 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 副主任研究員 (正会員)

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

物イオン濃度を調整したモルタル供試体を所定材齢後に解体し、目視により錆の発生状況を調べた結果に基づいている⁴⁾とされている。アルカリ性を示すコンクリートに埋設されている鉄筋表面は不動態化している。塩化物イオンが関与して鉄筋が腐食する場合、このイオンが不動態を破壊するために鉄がイオン化しやすくなるメカニズムが考えられている。生成した鉄イオンは酸化されて錆となる。したがって、進展期の開始すなわち腐食が始まる時期は、鉄のイオン化が始まる時と解釈すべきである。現行の閾値は錆の生成時期までを見込んだものであり、この点が研究者によって腐食発生限界濃度が異なる一因と思われる。

進展期の長さは、鋼材の腐食速度とひび割れ発生腐食量を与えられれば、腐食速度の時間積分値である腐食量がひび割れ発生腐食量を越える時期として算出できる。進展期の腐食速度にはコンクリートの材料的要因(水セメント比、塩化物含有量など)とコンクリートが設置されている環境要因(温度、湿度、雨がかりの状況など)の双方が関連する。腐食速度測定方法としては交流インピーダンス測定による分極抵抗法⁶⁾等を用いることができる。ひび割れ発生腐食量としてはコンクリート標準示方書〔維持管理編〕では $10\text{mg}/\text{cm}^2$ という値¹⁾が示されている。しかし、この腐食量を用いてひび割れの発生時期を算出した結果と実構造物の調査結果は必ずしも一致しない場合があると言われている³⁾。これまでの多くの鉄筋腐食調査事例によれば、鉄筋径 20mm 程度を使用してかぶり 5cm 程度までの構造物では、コンクリート表面にひび割れが認められる段階で、既に内部に埋設された鉄筋に沿う水平ひび割れが発生している場合が多い。そこで、本論文では、「ひび割れ発生時期」は鉄筋/コンクリート界面に鉄筋腐食によるひび割れが生じた段階として扱うこととする。

3. 実験概要

3.1 供試体および暴露条件

実験には図-1に示す鉄筋コンクリート供試体

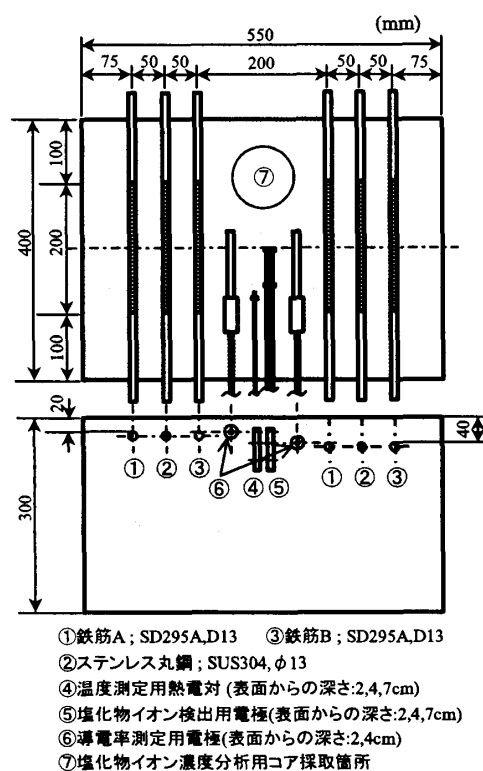


図-1 暴露実験用鉄筋コンクリート供試体

を用いた。かぶり 20 および 40mm の位置にそれぞれAおよびBの2本の鉄筋と1本のステンレス丸鋼を配置した。コンクリートは呼び方「普通30-8-20N」の生コンクリート(W/C 48%, C 359 kg/m^3 , スランプ 15.6cm , 空気量 5.8% , 材齢 28 日圧縮強度 27.9MPa)を使用した。1998年10月12日に打設した後、材齢 60 日までは布で包み、乾燥しないように散水しながら室内にて養生した。その後、木枠を取り付けた供試体上面に濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液を貯留し、蓋をした状態で屋外に暴露した。

3.2 測定項目および方法

(1) 非破壊検査

腐食反応は鉄がイオン化する酸化反応と溶存酸素の還元反応が同時に起こる電気化学的反応であり、これらが生じているか否かは自然電位で判断することができる。一般に、腐食性が増すとともに、自然電位はマイナスの大きな値をとるようになる。ASTMの判定基準によると、「 -350mV 以下ならば 90% 以上の確率で腐食あり」と判定される。よって、塩化物イオンの浸透による鉄筋の腐食開始時期を捉えるために、

自然電位とマクロセル電流を屋外暴露開始後から 30 分に 1 回の頻度で連続測定した。自然電位は鉄筋 B を電位差計の+端子に、銀塩化銀照合電極を-端子にそれぞれ接続した時の電位差計の指示値とし、測定値は 25℃での銅硫酸銅照合電極に対する値に換算した。一方、マクロセル電流は鉄筋 A とステンレス丸鋼を外部で無抵抗電流計を介して接続した時の電流計の指示値とした。

鉄筋の腐食速度は次のように考えた。暴露開始当初の腐食速度はほぼ零、次に腐食開始後は零でない値を示し、さらに経年が増して錆の体積膨張によりひび割れが発生すると腐食速度はさらに増大する。したがって、2段階目の腐食速度の増加がひび割れを生じた時期と考え、この時期を捉えるために、腐食速度と反比例の関係にある分極抵抗の経時変化を暴露7ヶ月目から1ヶ月に1回の頻度で測定した。鉄筋 B を試料極として、チタンメッシュ(対極)と銀塩化銀照合電極をコンクリート表面に配置した状態で、100kHz から 10mHz までの交流インピーダンス値から分極抵抗 $R_p(\Omega \text{ cm}^2)$ を求めた。腐食速度は、これを式(1)に代入して腐食電流密度 $I_{\text{corr}}(\text{A}/\text{cm}^2)$ を求め、ファラデーの第2法則から年間当りの単位表面積当りの腐食減量($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)に換算した⁵⁾。その積分値から腐食量の推定も可能となる。ここで、分極抵抗 $10\text{k}\Omega \text{ cm}^2$ は腐食速度 $23.7\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$ に相当する。

$$I_{\text{corr}} = K / R_p, \quad K: \text{定数} (= 0.026\text{V}) \quad (1)$$

(2) 破壊検査

材齢 1620 日に供試体からかぶり 2cm の鉄筋 B を、鉄筋を中心として径 50mm のコンクリートコアとして採取した。採取したコアは、腐食量測定用の長さ 45mm のもの四片と断面観察用の長さ 15mm のもの一片の五つに分割した。前者は目視観察後鉄筋を取り出し、再度 40mm に切断し JCI-SC1 に準拠して腐食量を測定した。後者の試料は錆の生成に伴う体積膨張量を把握するために、錆層の外観観察と鉄元素の 2 次元分布を求めた。また、JCI-SC8 および SC4 に準拠して、コンクリートコアを採取し、深さ方向の塩化物イオン(全塩分)濃度分布を求めた。

4. 結果ならびに考察

4.1 腐食発生限界塩化物イオン濃度

図-2 に 4.33 年後のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。これらデータをフィックの拡散方程式の解に近似して求めた塩化物イオンの見かけの拡散係数 D と表面での濃度 C_0 を用いて、かぶり 2 および 4cm での塩化物イオン濃度の経時変化を求めた。結果を図-3 に示す。

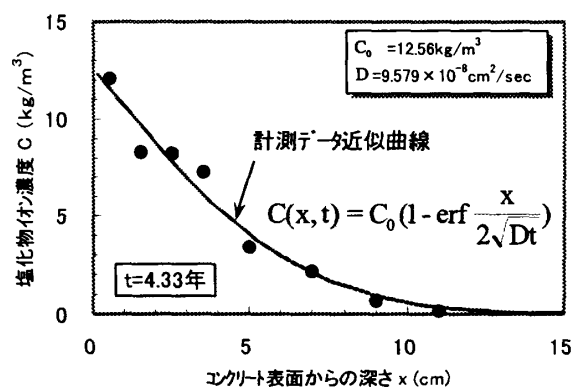


図-2 塩化物イオン(Cl^-)濃度分布

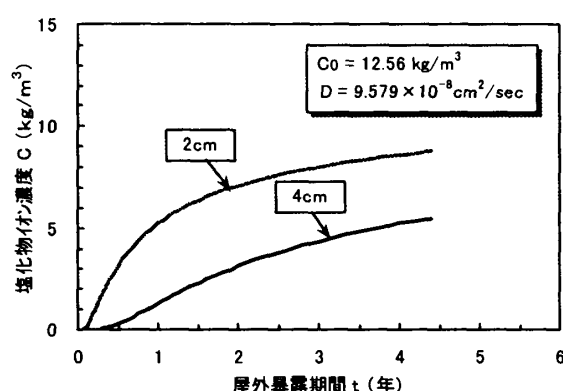


図-3 深さ 2 および 4cm での Cl^- の経時変化

一方、自然電位およびマクロセル電流の経時変化を図-4～5 に示す。当初大幅に変動していた自然電位が -350mV を下回る卑な値となり安定して推移し始めた時、鉄筋 B は腐食環境にあると判定される。また、マクロセル電流が流れ始めた時、鉄筋 A とステンレス丸鋼との間でマクロセル腐食が起こっていると判定される。そこで、かぶり 2 cm および 4cm の鉄筋について、腐食開始の目安となる時期をそれぞれ求め、かぶりの大きい 4cm の鉄筋については、その時の塩化物イオン濃度を図-3 より算出した。表-1 に

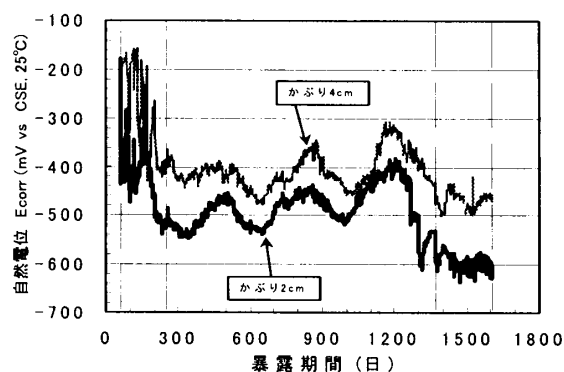


図-4 自然電位の経時変化

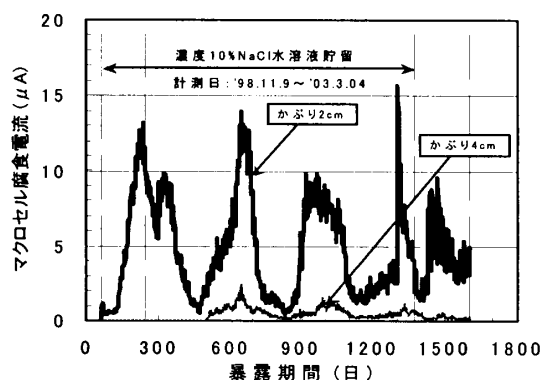


図-5 マクロセル電流の経時変化

表-1 腐食開始時期とその時の塩化物イオン濃度

鉄筋区分	かぶり (cm)	2	4	塩化物イオン濃度 (kg/m ³)
養生期間 (日) -※1-		60		
自然電位の低下 (日) -※2-		110	148	0.14
マクロセル電流の発生 (日) -※2-		6	450	1.8

※1: 供試体上面に NaCl 水溶液を貯留するまでの日数

※2: NaCl 水溶液を貯留した日を起点にした経過日数

示すように、海水が接するような海洋環境下において、2cm というかぶりでは塩化物イオンの侵入抑制効果をほとんど期待できないことが分かった。また、腐食発生限界塩化物イオン濃度としてコンクリート標準示方書〔施工編〕に記載されている 1.2kg/m³ と比べて、自然電位の低下からは 0.14kg/m³ と小さく、マクロセル電流の発生からは 1.8kg/m³ と大きな値が得られた。

4.2 ひび割れ発生前後の腐食速度

図-6 に、暴露 7 ヶ月後からの鉄筋 B の分極抵抗の経時変化を示す。かぶり 2cm の鉄筋の分極

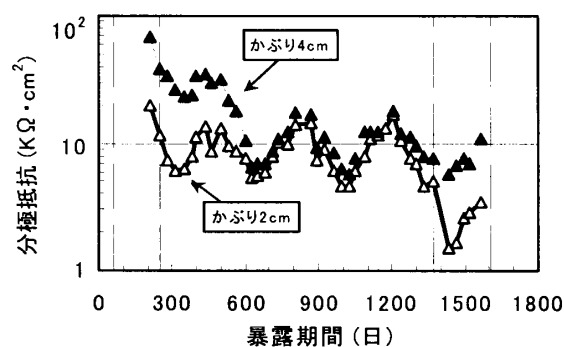


図-6 分極抵抗の経時変化

表-2 分極抵抗から求めた鉄筋 B (かぶり 2cm) の腐食量および腐食速度の推定値

材 齢 (日)	推定腐食量※ (mg/cm ²)	腐食量 比	平均腐食速度 (mg/cm ² /年)
170	0	0	0
1400	106	0.654	31.4 (進展期)
1620	162	1	92.9 (劣化期)

※分極抵抗から換算した腐食速度の時間積分値

抵抗は材齢 1400 日まで 5~20kΩcm² の範囲で気温の変動とともに変化しており、夏場の腐食速度は冬場の約 4 倍と推察される。1400 日以降の分極抵抗は最大でも 3.4 kΩcm² であり、1400 日以前よりもさらに小さくなっている。先に述べた劣化段階の区分では、1400 日までは鉄筋の腐食反応が進行する進展期、1400 日以降はひび割れが発生した後の劣化期と想定される。この段階ではコンクリート表面にはひび割れは認められないが、断面観察によれば鉄筋腐食による内部ひび割れが明らかに認められる。

これら分極抵抗値の逆数の時間積分値より暴露開始後 1400 日および 1620 日までの腐食量を推定した。結果は表-2 に示すとおりである。劣化予測において進展期と劣化期の腐食速度を同じとして解析する場合も示されているが、本実験の範囲では、劣化期の腐食速度は、進展期のおよそ 3 倍の値を示している。

4.3 ひび割れ発生状況

図-7 に鉄筋 B を中心に採取したコアを示す。腐食測定用コアは No.1~4 の四片で、断面観察

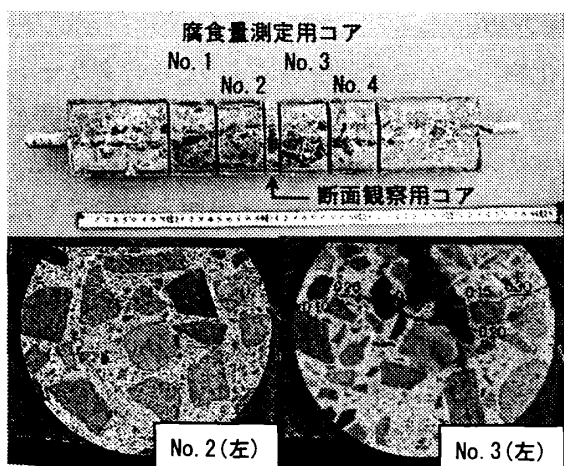


図-7 腐食量測定用コアとひび割れ生成状況

用コアは中央の小片である。各コアの両端の目視観察結果を行った結果、コア No.1 ではいずれの端にもひび割れは認められなかった。No.2 では中央よりの端面に、No.3 と No.4 では両方の端面にそれぞれ腐食によるひび割れが認められた。かぶり 20mm、鉄筋径 13mm では、腐食ひび割れは鉄筋/かぶりコンクリートの界面を起点とし表面に向かって進展する⁹⁾と予想されたが、鉄筋を起点に水平あるいは僅か斜めに伸びるひび割れが生じていた。原因は鉄筋間隔が 50mm と小さかったためで、ひび割れの入り方は、鉄筋の径やかぶりだけでなく鉄筋間隔の影響も強く受けることが分かった。したがって、鉄筋が密に入っている構造物においては、腐食ひび割れは鉄筋の直上には進展せずに、最初に鉄筋同士を結ぶように水平のひび割れが生じるケースが多いものと推察される。

4.4 ひび割れ発生腐食量

かぶり 2cm の鉄筋 B の腐食量を表-3 に示す。

鉄筋全表面積当りの腐食量(I)で整理すると、端面にひび割れが認められないコア No.1 でも $20.8\text{mg}/\text{cm}^2$ の腐食量がある。通常、ひび割れが生じた段階では鉄筋全体が腐食しているケースは稀で、多くの場合部分的である。そこで腐食量は鉄筋全表面積当りではなく、腐食面積当りで表現すべきであると考えた。腐食面積を考慮して整理すると、端面にひび割れが認められたコア No.2~4 の腐食量(II)は $255\sim 281\text{mg}/\text{cm}^2$ の範囲にあり、単位腐食面積当りの腐食量は全表面積当りの腐食量に比べ変動が小さい。

次にひび割れ発生腐食量について考える。表-3 の腐食量は腐食による内部ひび割れが発生したと考えられる材齢 1400 日の時点から、さらに 220 日経過後の結果であるから、220 日分の腐食反応の進行による腐食量を差し引いて考える必要がある。表-2 に示したように、分極抵抗から求めた材齢 1400 日までの推定腐食量は材齢 1620 日のおよそ 65%である。この割合を実際の腐食減量 (No.2~4 の平均値) に乗じて、材齢 1400 日すなわち腐食によるひび割れが生じた段階の腐食量を算出した。結果は単位腐食面積当りで $176\text{mg}/\text{cm}^2$ (鉄筋全表面積当りで $78\text{mg}/\text{cm}^2$) となった。ひび割れ発生腐食量は鉄筋の径やかぶりならびに 4.3 のひび割れ発生パターン等の影響を受けると考えられるが、コンクリート標準示方書に記載されている電食実験結果から得られた値 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ とは大きく異なる値となった。

以下、この点について言及する。

第 1 は算出の方法である。この値は鉄筋の全表面積当りの腐食量で整理されている。しかし、

表-3 材齢 1620 日時点での鉄筋 B (かぶり 2cm) の腐食量等

コア 区分	腐食量 (g) ①	鉄筋全表 面積(cm^2) ②	腐食量 (I) (mg/cm^2)		腐食面積 (cm^2) ③	腐食面積 率 (%) ③÷②	腐食量 (II) (mg/cm^2)		コンクリート腐 食ひび割 れの有無
			①÷②	平均			①÷③	平均	
No.1	0.34	16.32	20.8	20.8	2.86	17.5	119	119	無
No.2	1.33	16.32	81.5	120	5.22	32.0	255	270	有
No.3	1.89	16.32	115.8		6.89	42.2	274		
No.4	2.65	16.32	162.4		9.43	57.8	281		
平均			95.1	—	6.10	37.4	232	—	—

本論文では、ひび割れが生じる段階では鉄筋の全面が腐食していることはないという事実に基づいて、単位腐食面積当りの腐食量として整理している点が従前の考え方と異なる。

第2は錆の形態である。図-8にコアの研磨面の外観と錆層の鉄元素の2次元分布を示す。鉄筋断面を詳細に観察すると、錆が占める領域と鉄の溶出に伴う鉄筋の欠損領域はほぼ同一である。コンクリートの細孔溶液中に溶解している鉄イオンが酸化されて錆が生成する反応は、中性化してpHが10以下の中性環境に比べて遅い。したがって、鉄筋が溶解してもすぐに錆にはならないので、鉄筋が溶解した部分は空隙と見なしうる。これは一断面の観察結果であり、今後更なるデータの蓄積が必要であることはいうまでもない。しかし、従来の錆生成に伴う体積膨張率とは明らかに異なっている。

第3は鉄筋とコンクリート界面に存在する空隙⁷⁾である。腐食すると、その空隙を埋めてからコンクリート部に内圧を発生させる。しかし、電食による腐食の場合、局部的に腐食が進行することから広い範囲で鉄筋とコンクリート部の空隙を埋めることなく、局部的な腐食応力によりひび割れが発生するため、空隙の影響が出にくいことが考えられる。したがって実構造物では空隙を充填する分、腐食量が多く必要である。

以上から、ひび割れ発生腐食量の算出の方法、錆の形態・体積膨張率の違い、ならびに鉄筋/コンクリート界面での空隙の存在が原因で従来示されてきたひび割れ発生腐食量とは異なる結果となったものと推測される。

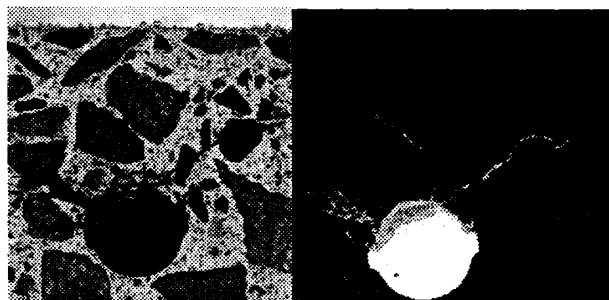


図-8 錆層とひび割れの生成状況（左）
錆層の鉄元素の2次元分布（右）

5. まとめ

塩化物イオンの拡散浸透により、コンクリートに塩分が導入される場合の腐食発生限界濃度とひび割れ発生腐食量を実験的に検証した結果、本実験の範囲では以下のことが明らかになった。

- (1) 腐食し始める時の鉄筋位置での全塩化物イオン濃度は $0.14 \sim 1.8 \text{ kg/m}^3$ と推察される。
- (2) 単位腐食面積当りの腐食量が 180 mg/cm^2 くらいになると、鉄筋とコンクリートとの界面にひび割れが生じることが判った。
- (3) 鉄筋の腐食速度は気温により変動し夏場は冬場の約4倍速い。また、ひび割れ発生後の腐食速度は発生前の約3倍に増大する。

参考文献

- 1) (社)土木学会：2001年度制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001.1
- 2) (社)土木学会：平成11年度版コンクリート標準示方書[施工編]-耐久性照査型-，2000.1
- 3) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術‘02-基礎編-，2002.1
- 4) 伊庭孝充，松島学，関博，川田秀夫：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的検討，土木学会論文集No.704/V-55，pp.1-11，2002.5
- 5) 横田優：埋設電極によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング，第2回コンクリート構造物の補修・補強アップグレードシンポジウム論文報告集第2巻，pp.333-338，2002.10
- 6) 松島学，堤知明，関博，松井邦人：鉄筋の腐食膨脹によるひびわれモード，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.727-732，1993.9
- 7) 松島学，関博，横田優：鉄筋の腐食膨脹によるひび割れ時腐食減量，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集第5部，V-077，pp.153-154，2003.9