論文　塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時の腐食量の評価に関する実験的検討

松元　淳一[*1]・堀口　賢一[*2]・丸屋　剛[*3]

要旨：本研究は，鉄筋コンクリートの塩害劣化のうち進展期を対象とし，進展期における腐食速度の推定と腐食ひび割れ発生時の腐食量の定量を行ったものである．実験では，自然電位などの非破壊検査情報や目視により，進展期の期間を正確に把握した．さらに分極抵抗を定期的に測定し，進展期における腐食速度を推定した．この推定腐食速度と，実測で測定した進展期の期間から算出した腐食ひび割れ発生までの腐食量を比較することで，分極抵抗から腐食ひび割れ発生時の腐食量を推定することは，ある程度可能であることを確認した．

キーワード：塩害，分極抵抗，自然電位，腐食速度，腐食ひび割れ

1. はじめに

塩害環境下の鉄筋コンクリート構造物においては，劣化過程の潜伏期の期間を決定する主要因である塩化物イオンがコンクリートに移動していく過程ならびに内部鉄筋の腐食が発生する時点を正確に把握することが不可欠であると考えられ，数多くの研究・検討がなされたことで，構造物の設計や維持管理を合理的に実施することも可能となった[1) 2) 3)]．

一方，進展期の期間を決定する主要因としては，コンクリート中の鉄筋の腐食速度と腐食ひび割れ発生時の鋼材の腐食量が挙げられている．しかしながら，腐食ひび割れ発生時点を正確に捉える手法や腐食ひび割れ発生に及ぼすそれぞれの要因の定量的な評価までは至っていないのが現状である．

そこで本研究では，鉄筋コンクリートの塩害劣化のうち進展期を対象とし，進展期における分極抵抗による腐食速度の推定と腐食ひび割れ発生時の腐食量の関係について定量的に評価を行った．実験では，鉛照合電極を埋設した鉄筋コンクリート供試体を製作し，濃度 3%の NaCl 溶液への乾湿繰返しを行いつつ，自然電位をモニタリングすることで進展期の開始時点を正確に捉えた．一方，腐食ひび割れの発生時点は目視により確認し，進展期の終了時点を把握することで，進展期の期間を評価した．また，定期的に分極抵抗を測定することで，進展期における腐食量を推定し，実測の腐食量と対比した．

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体は，水セメント比を 55%および 65%として**表－1** に示す配合で製作した各 6 体ずつのコンクリート供試体である（供試体 No.55N-1～No.55N-6，供試体 No.65N-1～No.65N-6）．配合の決定方法として，目標スランプを 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%として，各 W/C ごとに配合を定めた．なお，これらコンクリートの圧縮強度については，φ10×20cm の円柱供試体を用いて，初期標準養生 28 日の終了後に試験を行い，水セメント比 55%，65%でそれぞれ 39.9N/mm^2，28.1N/mm^2 であった．使用材料は**表－2** に示すように，セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材としては山砂，粗骨材としては最大骨材寸法 13mm の砕石を用いた．また，混和剤としてリグニンスルホン酸系 AE 減水剤を使用した．

実験供試体の形状・寸法を**図－1** に示す．試験面からかぶり 25mm となる様に SD295A の異形鉄筋 D19 を 1 本配筋し，φ10×100mm の鉛照合電極を 3 箇所（供試体中央，供試体中央から 400mm 離れた位置：2 箇所）に配置した．製作にあたっては，100×100×1200mm の型枠への打設とし，長さ 1200mm 方向に埋設鉛照合電極から離れた位置で 3 層縦打ちとした．この理由としては，ブリーディングなどの影響で，鉄筋とコンクリートの界面に水みちが発生することによる，塩化物イオンの局所的な濃縮を避けるためである．脱型後は，コンクリート表面の状況を目視で確認し，色むらなどから，品質にばらつきが無いことを判断した上で，28 日間の初期標準養生を行い，試験面を除く側面をエポキシ樹脂にて被覆し，7 日間乾燥後に実験に供した．なお，側面 4 面のみに表面被覆をしたのは，塩化物イオンの浸透を上下一方向に限定するためである．

2.2 実験方法

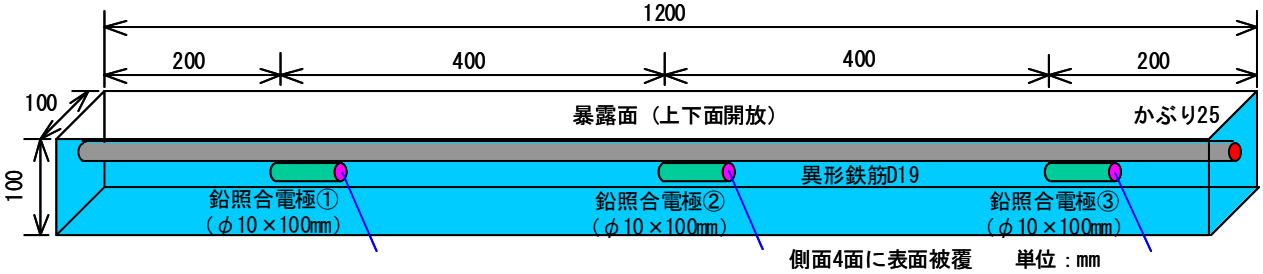
2.2.1 促進試験方法

促進試験方法としては，塩水浸せきと気中乾燥を繰り返す劣化促進試験（以下，「塩害促進試験」と称す）とし，風雨や日射の影響はないが，外気の温度や湿度の影

*1 大成建設（株）技術センター　土木技術研究所　土木構工法研究室　(正会員)
*2 大成建設（株）技術センター　土木技術研究所　土木構工法研究室　主任研究員　(正会員)
*3 大成建設（株）技術センター　土木技術研究所　土木構工法研究室　室長　(正会員)

表－1　供試体配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
					水 *W*	セメント *C*	細骨材 *S*	粗骨材 *G*	混和剤 *Ad*
13	10.5	55	5.2	50	175	318	886	907	3.18
13	13.0	65	5.1	52	180	277	933	881	2.76



図－1　供試体の形状・寸法

響を受ける屋内環境にて行った．促進条件は，塩水（NaCl 3%溶液）浸せき 3 日と乾燥 4 日の繰返しを 1 サイクルとし，腐食ひび割れが発生する時点まで実施することにした．

2.2.2 測定項目

本実験で行った測定項目を**表－3** に示す．

(1) 自然電位の計測

促進試験中は，供試体中に埋設した鉛照合電極を用い，鉄筋の腐食発生時点を適確に捉えるため，**写真-1** に示すように，自然電位を 10 分間隔で連続的にモニタリングした[1)]．

(2) 分極抵抗の計測

自然電位の低下によって腐食発生時点が明らかになった後，分極抵抗を交流インピーダンス法により 8 ないし 4 サイクルごとに，鉛照合電極を埋設した位置直上の供試体表面で測定した．なお，測定は，10Hz から 0.1mHz までの周波数域のうち，13 個の周波数における交流インピーダンスを測定し，その結果から，複素平面上に Cole-Cole プロットを描画して，分極抵抗の値を可能な限り厳密に求めた．

(3) 腐食状況確認

目視により腐食ひび割れが発生した時点で供試体を解体した．解体後は，埋設鉄筋を取り出して腐食面積および腐食生成物の質量を測定した．まず，腐食面積は，鉄筋にトレーシングペーパーを巻いて腐食範囲を写し取り，プラニメータで測定した．一方，腐食生成物については，一般的には鉄筋の腐食減量から腐食量を求めるが，腐食ひび割れ発生時の腐食量が微量であるため，誤差が大きくなる可能性があると考えられ，腐食生成物のみの質量を測定した．採取方法は，先端の尖ったハンマーとワイヤーブラシを用いて錆部分の付着物を落とし，

表－2　使用材料

使用材料	種類・品質
セメント	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3
細骨材	山砂，表乾密度 2.61g/cm^3，吸水率 2.15%
粗骨材	砕石，密度 2.67g/cm^3，吸水率 0.74%
混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

表－3　測定項目

測定項目	測定方法・測定頻度
自然電位	埋設した鉛照合電極で 10 分ごとに連続計測
分極抵抗	交流インピーダンス法で 8 ないし 4 サイクルごと
表面観察	目視で腐食ひび割れの有無を 1 サイクルごと
腐食面積	解体後の鉄筋に対し，プラニメータで測定
腐食量	解体後に腐食生成物を除去して，腐食生成物の質量測定
塩分量	解体直後に測定，JSCE‐G573‐2003 に準拠

写真-1　自然電位測定状況

磁石を用いて腐食生成物とモルタルを分離することとした．腐食生成物の質量について，文献[4)]によれば，塩化物イオンの多い環境で生成する腐食生成物は β-FeOOH の形態をしているため，磁石に対し磁性を持つと考えられる．このようにして測定した腐食生成物の質

量に，FeOOH（分子量 88.8）中の Fe（原子量 55.8）の割合を算出した比率（0.627）を乗じ，この値を腐食面積で除した値を実測の腐食量とした．

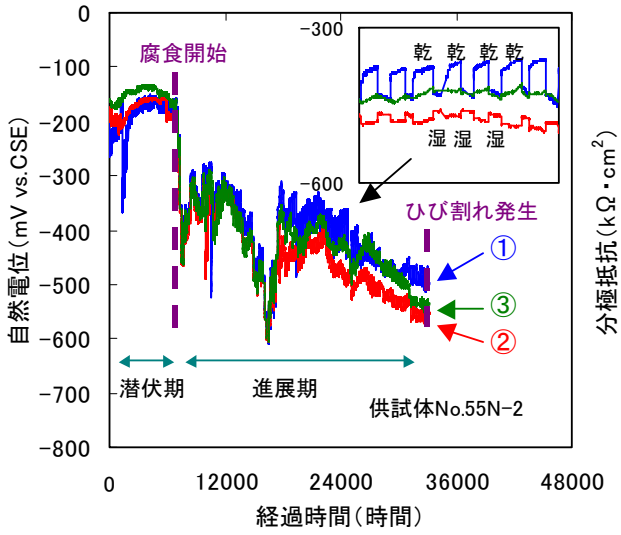
(4) 全塩化物イオン量の測定

供試体解体後に腐食ひび割れ近傍（表面計測による自然電位が最も卑な位置）および腐食ひび割れが発生していない位置（表面計測による自然電位が最も貴な位置）で，深さ方向に測定を行った．なお，測定方法は，土木学会規準 JSCE - G573 - 2007 に準じて行った．

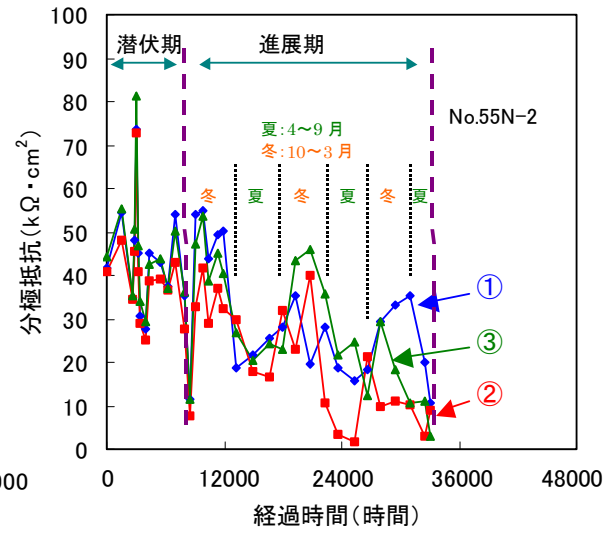
3. 試験結果および考察

3.1 自然電位

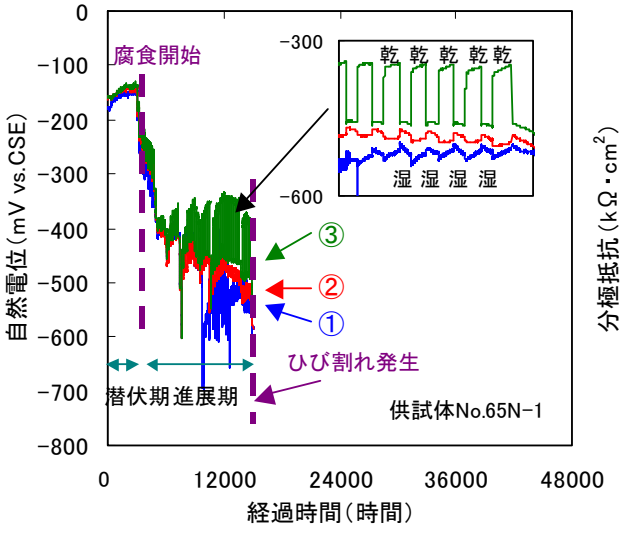
試験結果の一例として，供試体 No.55N-2 および供試体 No.65N-1 に埋設した照合電極で計測した自然電位の経時変化を**図－2，3** に示す．なお，ここでの凡例の数字は，**図－1** の照合電極番号と対比している．これより，水セメント比 65%供試体は試験開始 3093 時間後，水セメント比 55%供試体の場合では 6997 時間後に，自然電位の卑変が認められた．これは，文献[1]によると，鉄筋の腐食発生時点であり，進展期の開始時点と判断できる．これに対して，腐食発生から腐食ひび割れ発生までの期間，すなわち，進展期に相当する期間は，水セメント比が小さい場合の方が約 2.5 倍程度長くなる状況を示した．この傾向は，他の供試体でも同様であった．一方，腐食が発生し進展期になると，乾湿繰返しの影響による自然電位の振れ幅が大きくなる傾向を示した．文献[5]によれば，含水率の低下によってコンクリートの比抵抗は小さくなり，乾湿繰返し湿潤時にはマクロセル回路が形成されるのに対し，乾燥時には，比抵抗が大きくマクロセル腐食回路が形成されにくいが，自然電位差が大きいこと



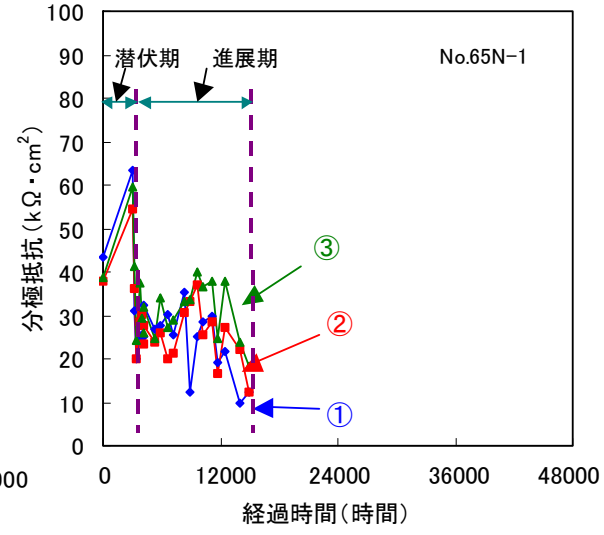
図－2　自然電位の経時変化（供試体 No. 55N-2）



図－4　分極抵抗の経時変化（供試体 No. 55N-2）



図－3　自然電位の経時変化（供試体 No. 65N-1）



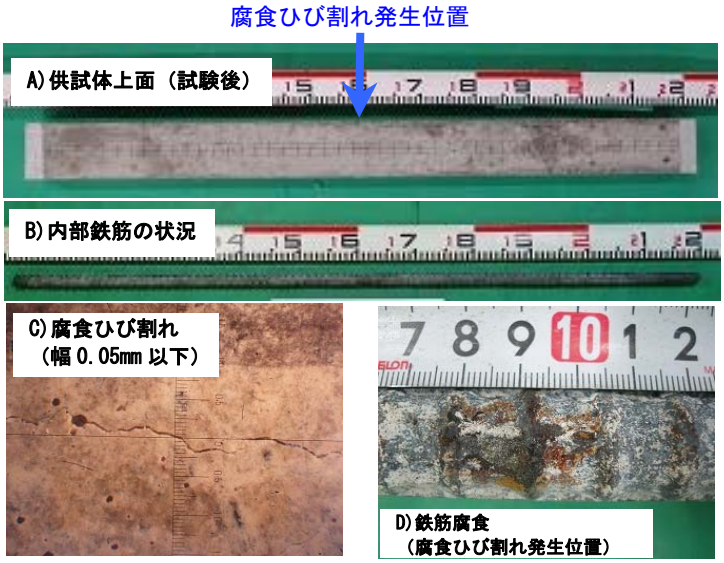
図－5　分極抵抗の経時変化（供試体 No. 65N-1）

によるミクロセル回路形成の状態であると考えられている．本研究では，水セメント比を 2 種類に変化させているが，65%と高水セメント比の方が乾湿の影響に伴う，自然電位の振れ幅はより顕著であり，湿潤時の 3 箇所（①～③）の差は水セメント比 55%の場合より小さく，乾燥時の 3 箇所（①～③）の差は大きくなっている．このことから，コンクリートの水密性が大きく影響していると考えられ，高水セメント比になるとポーラスであることから，乾湿繰返し作用で比抵抗が大きく変動し，湿潤時には，マクロセル回路がより形成されやすい状況にあり，乾燥時には，ミクロセル回路が形成されやすい状況にあったものと考えられる．

3.2 分極抵抗

図－4，5 に塩害促進試験中に供試体 No.55N-2 および供試体 No.65N-1 の表面より交流インピーダンス法で測定を行った分極抵抗の経時変化を示す．分極抵抗は相対的に夏季で小さく，冬季で大きくなり，気温が高いときに分極抵抗が小さくなる傾向が見られることから，気温により腐食速度が変化していることがわかる．これは，横田らによる既往の実験の結果とも整合するものである [6]．

腐食発生時点から腐食ひび割れ発生時点までの分極抵抗値は，水セメント比によって異なっており，水セメント比 55%では，緩やかに低下した後に，一定の腐食速度になる傾向を示した．これに対して，水セメント比 65%の場合を見ると，腐食発生直後には，既に 20～30kΩ・cm^2 を推移する傾向を示した．これより，水セメント比が大きい場合，塩化物イオンや酸素などの劣化因子が浸透・拡散しやすいため，腐食発生時点以降，腐食速度は急激に大きくなったものと考えられる．腐食ひび割れが発生した供試体（W/C55%：4 体，W/C65%：5 体）それぞれ 3 箇所（①～③）の腐食ひび割れ発生時点における分極抵抗の値を平均してみると，水セメント比の如何に拘らず，概ね 20kΩ・cm^2 であった．一方，自然電位の測定結果と分極抵抗の測定結果を比較すると，水セメント比 55%および 65%のいずれも，埋設照合電極 3 本（①～③）のうち，自然電位が最も卑な値を示した位置で分極抵抗は小さく，貴な値を示したところで分極抵抗は幾分大きくなっていることから，自然電位と分極抵抗の測定結果は対応していると判断できる．また，腐食ひび割れも自然電位・分極抵抗の値が小さいところで発生していたことから，これら非破壊検査の情報で腐食ひび割れの発生位置を推定することは可能であると考えられた．



写真－2　解体調査時の供試体表面および内部鉄筋の状況

表－4　解体時の鉄筋腐食面積

供試体	腐食面積 (mm^2)	供試体	腐食面積 (mm^2)
55N-1	3390	65N-1	2800
55N-2	8420	65N-2	2070
55N-3	2890	65N-3	2090
55N-4	2290	(65N-4)	(1270)
(55N-5)	(680)	65N-5	2190
(55N-6)	(500)	65N-6	858

※腐食ひび割れなし（供試体 55N-5，供試体 55N-6，供試体 65N-4）
※鉄筋全面積：71969mm^2

3.3 鉄筋腐食の状況

供試体 No.55N-2 において初期養生期間 28 日後，塩害促進試験を腐食ひび割れ発生時点まで行った後の腐食ひび割れおよび鉄筋腐食の状況を**写真－2** に示す．コンクリート表面には，幅 0.05mm 以下の腐食ひび割れが鉄筋軸方向に認められた．この腐食ひび割れが発生した供試体中央直下の鉄筋においては，激しい腐食が認められ，部分的に孔食が発生していた．一方，腐食ひび割れ部以外でも鉄筋腐食が確認された．

表－4 にそれぞれの供試体における腐食ひび割れ発生時点の鉄筋腐食面積を示す．一部供試体においては，腐食ひび割れが発生する前に解体調査を行った（供試体 No.55N-5，供試体 No.55N-6，供試体 No.65N-4）．鉄筋の腐食面積には若干のばらつきが認められるが，今回の試験条件では，供試体 No.65N-6 を除いて，腐食面積が概ね 2000mm^{2}以上で腐食ひび割れが発生していた．また，水セメント比が異なった場合でも腐食ひび割れ発生時点の腐食面積は同程度であった．

次に，**表－5** には，腐食発生からと腐食ひび割れ発生までの長さ，すなわち，進展期の期間と分極抵抗の値よ

表－5　進展期の期間，腐食量の推定値と実測値

供試体	進展期の期間（時間）	推定値			実測値				腐食量（平均）推定/実測比率
		分極抵抗（kΩ・cm²）	腐食量（mg/cm²）	腐食量（平均）（mg/cm²）	腐食生成物質量（mg）	5cm 範囲の腐食面積（mm²）	腐食量（mg/cm²）	腐食量（平均）（mg/cm²）	
55N-1	20649	33.6	16.6	16.1	13	24.0	34.0	19.4	0.83
55N-2	26133	20.6	34.4		88	591.0	9.4		
55N-3	12981	13.2	26.6		272	1074.0	15.9		
55N-4	13298	16.3	8.8		68	233.4	18.4		
(55N-5)	－	31.4	3.2		70	508.0	8.6		
(55N-6)	－	20.6	7.0		139	290.0	30.1		
65N-1	11945	11.0	29.4	23.4	217	421.9	32.3	25.8	0.91
65N-2	6811	14.4	12.8		257	628.1	25.7		
65N-3	10855	7.0	42.1		316	978.4	20.3		
(65N-4)	－	27.6	6.2		180	202.0	55.9		
65N-5	7489	8.4	24.3		77	936.9	5.2		
65N-6	8777	9.2	25.8		140	567.5	15.5		

※腐食ひび割れなし（供試体 55N-5，供試体 55N-6，供試体 65N-4）
※5cm 範囲の腐食面積：鉄筋長さ 5cm ごとに区切って求めた腐食面積

り推定した腐食量および供試体解体後に実測した腐食量を示した．分極抵抗から腐食電流密度を算出する際の Stern-Geary 式の K 値は，0.026（V）とした[7]．この腐食電流密度と進展期の期間をパラメータとして，式（1）のファラデーの法則から推定腐食量を算出した．

$$m = \frac{I_{corr} \cdot t_p \cdot a}{n \cdot F} \quad \cdots (1)$$

m：腐食量（mg/cm²）
t_p：進展期の経過時間（s）
a：鉄の原子量（55.845）
n：溶解した鉄イオンの当量（mol eq）
F：ファラデー定数（96500C/mol eq）

ここで用いている分極抵抗の値は，供試体解体直前に供試体表面の鉄筋直上において 25mm ピッチで表面より自然電位を測定し，その分布の中で最も卑であった位置，すなわち，腐食ひび割れ近傍の値である．一方，腐食量の実測値については，5cm 範囲の腐食面積と腐食生成物の質量から算出した．ここで，5cm 範囲の腐食面積とは，腐食面積を鉄筋長さ 5cm ごとに区切って求めており，本研究では，腐食ひび割れ発生位置の腐食ひび割れを含む長さ 5cm の範囲の腐食面積を対象とした．

一般的には，腐食ひび割れ発生時の腐食量は，鉄筋径，かぶり，引張強度によって異なるものの，10～100mg/cm² と考えられている[8) 9)]．ほとんどの供試体が，その範囲内で腐食ひび割れが発生していた．ここで，分極抵抗から推定した腐食量と実測の腐食量の比較をしてみると，個々の供試体レベルでは，必ずしも一致するとは言えない結果を示した．これは，今回の試験条件である，かぶり 25mm では，ひび割れ発生時の腐食の絶対量がごく僅かであることから，分極抵抗から推定される腐食量のばらつきが大きくなったことによるものと推察された．ただし，同一水セメント比供試体おける推定腐食量と実測の腐食量におけるそれぞれの平均値（比率）を見てみると，水セメント比 55%，65%でそれぞれ 0.83，0.91 であったことから，本研究の検討範囲内でも数多くの供試体の平均化することで，分極抵抗から腐食量を推定することは可能であり，進展期の期間を推定できるものと考えられる．

3.4 塩化物イオン濃度

図－6 には，一例として，供試体 No.65N-6 を初期養生期間 28 日後，「塩害促進試験」を腐食ひび割れ発生時点まで行った後の内部の塩化物イオン濃度分布を示す．なお，測定は腐食ひび割れ近傍と腐食ひび割れから離れたひび割れ無しの部分において行っており，それらのデータを併せて示した．腐食ひび割れ部は，ひび割れのない部分に比べ，塩化物イオンの浸透量は顕著に多くなっており，それぞれの測定位置で 1.3～2.0 倍の増加が確認された．

図－7には，腐食ひび割れ発生時点における鉄筋位置の塩化物イオン濃度と分極抵抗から推定した腐食速度の関係を示した．なお，鉄筋位置での塩化物イオン濃度を算出する際に使用するパラメータの表面塩分量および見掛けの塩化物イオン拡散係数は，塩化物イオン濃度分布からFickの拡散方程式にて算出した．本研究の範囲

内では，腐食ひび割れ発生時点における鉄筋位置での塩化物イオン濃度は3.0kg/m^{3}以上であり，腐食発生限界塩化物イオン濃度と同様に低水セメント比の方が大きくなる傾向を示した．また，鉄筋位置の塩化物イオン濃度が多くなるに従って，腐食速度は大きくなると予想されたが，必ずしもその通りではなく，鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食速度に明確な関係は認められない．

4. まとめ

本研究は，鉄筋コンクリートの塩害劣化のうち進展期を対象とし，進展期における分極抵抗による腐食速度の推定と腐食ひび割れ発生腐食量の関係について定量的に評価を行った．以下に得られた結論を示す．

（1）供試体内部に埋設した電極による自然電位の連続モニタリングにより腐食発生時点を明確に捉え，一方，目視により腐食ひび割れ発生時点を捉えることで進展期の期間を明確にすることができた．

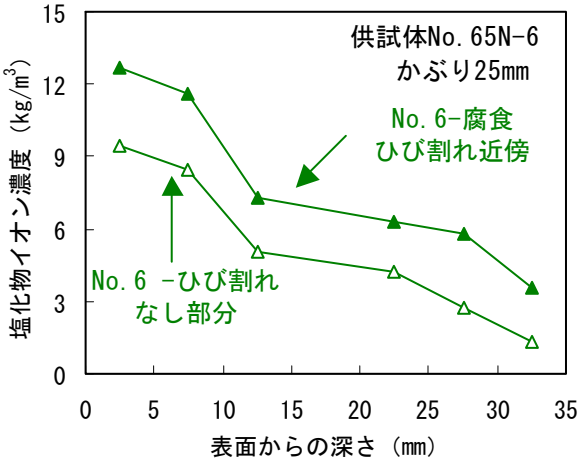
（2）鉄筋コンクリート構造物が塩害劣化の進展期にある場合では，乾湿繰返しなどの環境条件によって，自然電位の振れ幅が大きくなり，比抵抗が変化することによって，マクロセル回路の形成状態が変化しているためであると考えられた．

（3）自然電位や分極抵抗などの非破壊検査の測定値は，外気の温度の影響を大きく受ける．また，進展期における鉄筋の腐食速度は，水セメント比によって異なるが，腐食ひび割れ発生時点では，概ね 20kΩ・cm^2 であった．

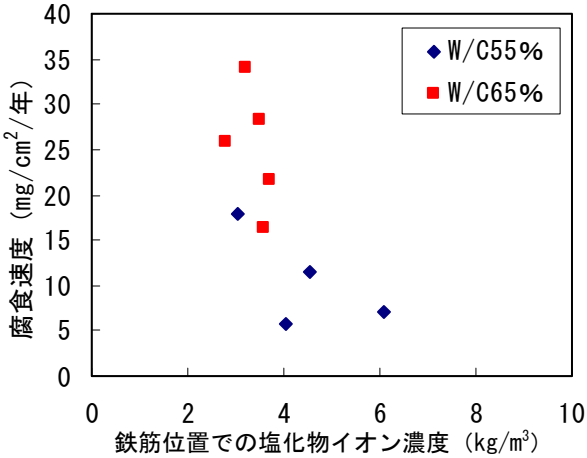
（4）腐食ひび割れ発生位置と自然電位および分極抵抗の測定結果は対応しており，これら非破壊検査の情報で腐食ひび割れの発生位置を推定することは可能であると考えられた．

（5）実測の腐食ひび割れ発生腐食量と分極抵抗から求めた腐食速度による推定腐食量を比較することにより，分極抵抗から腐食ひび割れ発生時の腐食量を推定することは，ある程度可能であることを確認した．

（6）本研究の検討の範囲内では，鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食速度に明確な関係は認められない．



図－6　供試体 No. 65N-6 の全塩化物イオン濃度分布



図－7　鉄筋位置の塩化物イオン濃度と
分極抵抗から推定した腐食速度の関係

参考文献

1) 堀口賢一，丸屋剛，武若耕司：自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と発生限界塩化物イオン濃度の推定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1007-1012，2006

2) 前田聡，武若耕司，山口明伸：塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価，土木学会論文集，5-63 号, pp.109-120, 2004

3) 細川佳史，山田一夫，高見満，杉山隆文：電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.725-730，2003

4) 金貞辰，朴同天，兼松学，野口貴文：鉄微粉末混入によるモルタル中の鉄筋の腐食抑制メカニズムに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.1037-1042，2006

5) 丸屋剛，武田均，堀口賢一，小山哲：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する再現実験と数値解析，土木学会論文集 E, Vol.64,No.4, pp.500-514, 2008.10

6) 横田優：建設後 36 年経過した RC 造開水路側壁の腐食モニタリング結果について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.185-190，1998

7) 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，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

8) 土木学会：コンクリート標準示方書維持管理編,2007

9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム,委員会報告,2004