コンクリート構造物の塩害劣化における マクロセル腐食の定量的評価

武田 均・Ahmet GOKCE・堀口賢一^{*1}・丸屋 剛

Keywords: RC structure, corrosion, chloride attack, half-cell potential, corrosive amount 鉄筋コンクリート,腐食,塩害,自然電位,腐食量

1. はじめに

塩害や中性化による鉄筋コンクリート構造物の劣化に おいて,ひび割れや剥離・剥落といった損傷が顕在化す る直接の原因はコンクリートにおける鋼材の腐食である. 近年,劣化因子の移動・蓄積の観点から,鋼材の腐食に よるコンクリート構造物の劣化に関していくつかの指標 が提案され,劣化予測などが試行されている¹⁾.しかし ながら,現段階ではコンクリート中における鋼材の腐食 メカニズムを十分に考慮した劣化予測手法は確立されて いない、本研究は、中性化や塩害によるコンクリート中 の鋼材の腐食による構造物の劣化を電気化学的なアプロ - チによって評価することを目的としている. そこで, 使用材料,配合,暴露環境等の条件が明らかな供試体に よる実環境暴露実験を実施し,自然電位モニタリングお よび腐食ひび割れが生じた供試体の解体調査を行い,実 海洋環境下におけるマクロセルの形成について検討する と共に,自然電位法による鉄筋の腐食量の評価手法につ いて検討した.

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートの仕様,材料および配合を表-1 に示す. セメントは普通ポルトランドセメント,細骨材および粗 骨材は天然骨材を使用した.また,供試体中に埋設した 鋼材は異形鉄筋 D13 を用いた.コンクリートの仕様は, 粗骨材の最大寸法 20mm,スランプ 10cm ± 2.5cm,空気 量 4.5% ± 1.5%とし,配合は,水セメント比 60%,単位 水量 162kg/m³とした.

供試体の形状・寸法を図-1 に示す.供試体の外形は 断面 100×100mm,長さ 1200mm の直方体であり,内部

* 1 東京支店朝霞浄水場工事

には異形鉄筋 D13 をかぶり 20mm で配置した.供試体 の端面および端部から 200mm の範囲の上下面と側面は アクリル樹脂系の表面被覆を行ない,暴露面を上下面の 中央部 100×800mm の範囲として供試体中への物質移 動および乾燥などが上下方向の 1 次元に限定されるよう にした.

表-1 コンクリートの仕様および配合 Concrete properties and mixture proportions

	ス	小			単位量(kg/m³)				
G _{max} mm	ランプ ㎝	王気量 %	W/C %	s/a %	水	セメント	細骨材	粗 骨材	混 和 剤
20	10	4.5	60	46.1	162	270	858	1011	0.68
セメント:普通ポルトランドセメント,密度 3.15g/cm ³ 細骨材:山砂,密度 2.63g/cm ³ ,吸水率 1.79% 粗骨材:砕石,密度 2.66g/cm ³ ,吸水率 0.70% 混和剤:AE 減水剤(標準形)									





2.2 養生条件および暴露条件

製作後 28 日間は 20 の水中養生を行い,引き続き表 面被覆工などを行った後,材齢 57 日で写真-1 に示すよ うな実海洋環境下に暴露した.なお,暴露面は上下方向 とし,かぶり 20mm の面を下向きに暴露した.暴露地 点は,波浪による飛沫が頻繁に作用し,海水の作用や降 雨などの天候の影響によって乾燥湿潤が繰り返される環



写真-1 暴露環境(伊豆海洋公園内) View of the exposure test site

境である.

2.3 試験測定項目および方法

暴露期間中における腐食状態の追跡調査として供試体 の外観観察による腐食ひび割れの記録,内部に埋め込ん だ鋼材の自然電位分布をモニタリングし,さらに鋼材の 腐食が進行した段階で供試体を引上げ,解体調査により 内部鋼材の腐食量を直接測定した.

2.3.1 自然電位モニタリング方法

鉄筋の腐食状況をモニタリングすることを目的として, 暴露開始後6ヵ月に1回の頻度で自然電位分布を測定した.自然電位分布の経時的な変化により腐食量を算定して,後述する鋼材の腐食量の実測結果と比較検討した.

自然電位の測定方法を図-2 に示す.図に示したよう に電位差計のプラス端子とコンクリート内部に埋め込ん だ鉄筋の一端をリード線を介して接続した.同様にマイ ナス端子にリード線を介して照合電極を接続した.照合 電極をかぶりコンクリート上から鉄筋直上に接触させて 電位を測定した.試験測定時には測定面を水道水により 湿潤状態に調整した.照合電極には鉛照合電極を使用し, コンクリート面と接触する先端部には飽和水酸化カルシ ウム溶液を染み込ませたスポンジを使用した.

測定位置は,被覆を行っていない暴露面 800mm の区 間であり,25mm ピッチで照合電極を移動させながら鉄 筋直上の各点の自然電位を測定し,その分布を調査した. 2.3.2 解体調査

暴露期間 32 ヵ月で供試体を回収した.鋼材の腐食量 や断面欠損率を詳細に検討するために,供試体を長手方 向に割裂して内部の鉄筋を取り出した.この時点の腐食 状況を写真および透明フィルム上に記録した.その後, JCI-SC1 に準拠して,10%クエン酸ニアンモニウム溶液 (60)に7.5時間浸漬して腐食生成物を除去した.図 -3 に示した方法で,腐食生成物を除去した鉄筋の断面 形状を測定して腐食量を算定した.なお,鉄筋の断面形 状は,約 20mm ピッチで測定し,特に断面欠損が激し



い箇所についてはその位置においても断面形状を測定した.同様に,断面形状測定における円周方向の分割数は 36分割としたが,腐食による断面欠損が激しい点があれば,その点についても深さの測定を行った.

結果および考察

3.1 鋼材の腐食状況

腐食ひび割れの発生状況と解体調査による鋼材の断面 形状から求めた断面残存率(残存面積/公称面積)を図-4 に示す.最大の断面欠損箇所では断面積が 87.8%にま で減少していた.腐食が顕著であった箇所の鋼材の断面 形状から,鋼材の腐食はかぶり側の面で進行し,片面の みが断面減少していくことがわかった.なお,腐食ひび 割れの発生が確認されたのは,18 ヵ月の調査時であっ た.したがって,腐食ひび割れの発生時期は暴露 13 ヵ 月以降 18 ヵ月までの間である.外観のひび割れ発生位 置は内部の鋼材の腐食位置と対応していた.

3.2 自然電位分布の経時変化と腐食量の経時変化

自然電位のモニタリング結果を図-5 に示す.初期の 自然電位分布は 300(mV vs PRE, PRE は鉛照合電極電位 を表す.以下同様に電位は鉛照合電極電位で示す)程度 の平坦な分布であった.その後暴露期間の経過とともに, 鉄筋軸方向で 100mV 程度の電位差が生じた.しかしな



がら,自然電位の絶対値は初期値から暴露終了時の 32 ヵ月まで 200mV 程度の範囲内で変動しており,電位の 絶対値のみによって鋼材の腐食状況を判定することは困 難であった.

(1) 腐食電流密度の算定^{2),3)}

連続した直線上の鋼材の電位分布により回路が形成されるマクロセル腐食を想定して,以下のような考え方に 基づいて,着目点(*i*)における電流密度を式(1)により計 算した.

- ・ある時点における着目点(*i*)と測定点(*j*)との 2 点によ り構成される回路の電流密度は,2 点間の電位差,回 路の見掛けの比抵抗および点間距離によって決まる.
- ・全ての測定点()について,上述のような着目点 (i)との2点で構成される回路を想定することによって,個々の回路の電流密度をそれぞれ計算し,そ の総和を着目点(i)に流入あるいは流出する電流密 度とした.

$$I_{i} = \sum_{j=1}^{n} \frac{\delta E_{i,j}}{\rho \cdot \delta L_{i,j}} \tag{1}$$

ここに,*I_i*:i 点の腐食電流密度(mA/cm²) *E_{ij}*:i 点と j 点との電位差(mV) *L_{ij}*:i 点と j 点との距離(cm) :比抵抗(cm)



(2) 腐食量の算定

腐食量は,式(2)に示すファラデーの法則により計算





した.

$$n = \frac{I_i \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \tag{2}$$

I_i:単位長さ当たりの腐食電流量(mA/cm)

t:時間(s)

a:鉄の原子量(g)

n:溶解した鉄イオンの当量 (mol eq.)

F:ファラデー定数,96500 (C/mol eq.)

腐食による鉄筋の断面欠損量は式(3)により計算した.

$$A_1 = \frac{m}{\gamma_{Fe}} \tag{3}$$

ここに, *A*¹: 断面欠損量(cm²)

m:腐食量(mg/cm)

Fe: 鉄の密度, 7870(mg/cm³)

(3) 腐食量の経時変化

図-6 に自然電位のモニタリング結果から求めた腐食 量分布の経時変化を示す.中央部の腐食量について計算 値と計測値が一致するような式(1)に示した比抵抗を 検討した結果,比抵抗の値は6k cmとなった.図から, 暴露後1ヵ月程度で供試体の中央部付近が腐食域となる 腐食が生じていると推察され,その後も供試体中央部が 常にアノード(腐食域)となるマクロセルが形成されて いる.また,腐食域となったのは,中央部の他,左側お







よび右側の各 1 箇所であったが,比較的初期には中央部 および左側が腐食域となり,13 ヵ月経過以降は中央お よび右側が腐食域になったと考えられる.供試体中央部 の腐食域では1日当たりの腐食量は暴露期間8ヵ月以降 -0.5mg/day程度でほぼ一定の速度であったと推察される. したがって,たとえ1回の自然電位の計測結果であって も,電流密度分布を評価することによって腐食が進行す る可能性のある位置については,ある程度推定できると 考えられる.

図-7 には,図-4 に示した 32 ヵ月の暴露終了後の鋼材 の断面残存率の計測値と自然電位分布から計算した最終 の断面残存率を比較して示した.図から,腐食が生じた 位置については計算値と実測値は良く一致していること



図・3 空族下の自然電位とマッコとかの形成 Formation of the macro cell corresponding to half cell potential under the coating

がわかる.断面残存率の値については,中央部の腐食域 で計測値と計算値が良く一致するような比抵抗を設定し た結果,左側および右側の腐食域では,計算値は計測さ れた断面残存率よりも小さく評価された.これは,供試 体の両端部 200mm の範囲を表面被覆し,自然電位の計 測を実施していないため,腐食量の計算範囲からも除外 したことによって,後述するように実際よりもカソ-ド の範囲が小さく評価されているためであると考えられる. 両端 200mm の範囲の被覆下では,塩化物イオンの供給 がほとんどなく,細孔中には溶存酸素分の酸素は供給さ れるため,鋼材の電位が比較的高いカソード域になって いると考えられる.したがって,腐食量の計算において 被覆下をカソード域として考慮すれば,被覆近傍の左右 のアノ-ド域の腐食量が計測値に近づくことになる.以 上から,被覆部との境界部の鋼材の腐食量を精度良く計 算するためには,表面被覆下の鋼材の電位を考慮する必 要があることがわかった.

3.3 塗膜の存在によるマクロセルの形成

図-8 は,塗膜下の鋼材の自然電位を 100mV から 500mV の範囲で仮定して断面残存率の分布を計算した 結果である.塗膜下の電位が 100mV および 200mV の 場合には,塗膜下が腐食域になると予想される.塗膜下 の自然電位が 300mV 以上の場合には,表面被覆範囲の 近傍の非被覆部が腐食域になると予想され,塗膜下の電 位が高いほど,この範囲の腐食量は大きくなる.一方, 中央部は常に腐食域となり,塗膜下の電位を変化させた 場合の中央部の腐食量の変化量は,塗膜近傍の変化量と 比較して小さい結果となった.このことから,中央部が アノードとなるマクロセルの形成に関しては,塗膜下の 電位の影響は比較的小さく,マクロセルの形成による腐 食域は 80cm 程度の範囲内の電位の釣り合いおよび比抵 抗の値によって決定されると考えられる.

塩害により既に劣化している構造物に対して部分的な 補修を施した場合にも,ここで仮定したように,塗膜下 の鋼材の電位が被覆していない部分の鋼材の電位よりも 高くなることが予想され,部分的な表面被覆を施すこと は,未補修部の鋼材の腐食を促進する可能性が示唆され た.鋼材の電位勾配が形成されるといった観点からみれ ば,表面被覆を部分的に実施した場合に限らず,断面修 復を部分的に実施した場合にも同様に未補修部の鋼材の 腐食が促進されることが予想される.

3.4 腐食ひび割れ発生時の腐食量

図-9 に,最も激しく腐食した供試体中央部の累積腐 食量の経時変化の計算値を示す.図に示したように,供 試体中央付近の腐食ひび割れは暴露期間 13 ヵ月の調査 後 18 ヵ月の調査時点で確認されたことから,腐食ひび 割れ発生時の鋼材の腐食量は,-130mg/cm~-200mg/cm 程度であったと推定される.

4. まとめ

本論文では,自然電位のモニタリング結果から鋼材の 腐食量を推定し,実測した鋼材の腐食量との比較検討を 行った.得られた結果は以下のとおりである.



図-9 最大腐食量(中央付近)の経時変化(計算値) Maximum weight loss(calculated)

- 計測された自然電位分布を用いることによって、 コンクリート中の鋼材の腐食が生じる位置および腐 食量の経時変化が評価できる.また、ここで仮定し た計算手法におけるマクロセルの見掛けの比抵抗は 6k cm 程度であると評価された.
- 2)部分的な表面被覆を行った場合に、塗膜のない範囲の腐食量を精度良く推定するためには、表面被覆範囲の鉄筋をカソード部として考慮する必要がある。
- 3) アノ ド部およびカソード部から構成されるマクロセルは暴露開始後1ヵ月程度で形成され,その後は形成されたアノード部およびカソ ド部の位置が大きく変化することはなく,アノード部で腐食が進行する.
- 4)塗膜下の自然電位を仮定することによりマクロセル腐食が形成される条件について考察した結果、マクロセルは80cm程度の範囲の電位分布により形成され、これより遠い位置の電位の影響は比較的小さいと考えられた.また、部分的な補修は未補修部の腐食を促進する可能性が示唆された.

参考文献

- 1) (社) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理 編], 2001.1
- Hsu, K. L., Takeda, H. and Maruya, T.: Numerical simulation on corrosion of steel in concrete structures under chloride attack, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.655/V-48, pp.143-157, 2000.8
- (社)日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(III)., 1996.10.