

塩害による鉄筋腐食の定量的評価

—ひび割れ幅、コンクリート表面の隆起量から鉄筋腐食量を推定—

堀口 賢一*¹・武田 均*¹・丸屋 剛*¹

Keywords : salt attack, half-cell potential, macrocell corrosion, amount of corrosion, crack width, amount of surface rising

塩害, 自然電位, マクロセル腐食, 腐食量, ひび割れ幅, 表面隆起量

1. はじめに

近年、塩害を受けている既設コンクリート構造物の維持管理¹⁾ばかりでなく、塩害を受ける可能性のある新設コンクリート構造物においても、設計・施工の段階で、塩害に対する耐久性の照査を行うことが要求^{2), 3)}されるようになっている。このような耐久性の照査では、鋼材の腐食で発生する腐食ひび割れの発生時期を予測することが重要であるが、現段階ではコンクリート中の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まだ確立されておらず、鉄筋位置における塩化物量を規制することで、塩害に対する耐久性を考慮している。

本研究は、塩害によるコンクリート中の鋼材の腐食を電気化学的にとらえ、腐食ひび割れ発生前後の鋼材の腐食を定量的に評価することを目的とした。塩害における鉄筋の腐食は、マクロセル腐食となるため、十分な長さの供試体を製作し、海洋環境下に暴露して自然電位の経時変化を測定した。また、暴露期間の異なる供試体を暴露終了時に解体し、鉄筋の腐食量を測定して、自然電位と鋼材の腐食量、およびひび割れの幅やコンクリート表面の隆起量に着目した検討を行った。

2. 実験内容

2.1 供試体

表-1 に供試体の製作に用いたコンクリートの配合および材料を示す。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、供試体に埋め込んだ鉄筋は異形鉄筋の SD 295A D13 である。コンクリートの仕様は、粗骨材の最大寸法 20mm、スランプ 10±2.5cm、空気量 4.5±1.5%、水セメント比 60%、および単位水量 162kg/m³とした。供試体はこの仕様で

3 体製作し、全て同じ海洋環境での暴露に供した。

図-1 に供試体の寸法・形状を示す。供試体は 100×100×1200mm で、内部に D13 をかぶり 20mm で 1 本配置し、長さ 1200mm の方向を縦にしてコンクリートを打設した。また、供試体表面には、暴露する上・下面の中央 100×800mm を除く部分からの塩化物の浸透を抑制するため、図-1 に示すように、アクリル樹脂系表面被覆材を塗布した。

2.2 暴露条件

供試体の打設後 28 日間は 20℃の水中養生を行い、その後、表面被覆材の塗布などの処理をして、材齢 57 日で写真-1 に示す海洋環境下に暴露を開始した。供試体は、表面被覆材を塗布していないかぶり 20mm の面が

表-1 コンクリートの配合
Mix Proportion of Concrete

G _{max} mm	スランプ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
					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/cm³
 細骨材：山砂，密度 2.63g/cm³，吸水率 1.79%
 粗骨材：碎石，密度 2.66g/cm³，吸水率 0.70%
 混和剤：AE 減水剤（標準形）

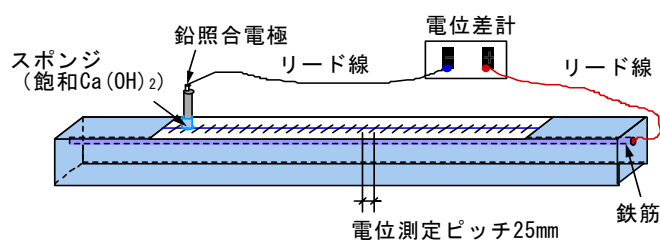


図-2 自然電位の測定方法
Halfcell Potential Measurement

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室



写真-1 供試体暴露場
View of the Exposure Test Site

下向きになるように設置した。暴露場は静岡県伊東市の伊豆海洋公園内に位置する。暴露地点は、海に隣接するところで、波浪による飛沫が頻繁に作用し、降雨や日射などの天候の影響により乾湿が繰り返される飛沫帯である。

2.3 測定項目および方法

暴露した供試体の劣化を確認するために、目視観察による腐食ひび割れの確認（位置と幅）と自然電位の測定を定期的におこなった。また、腐食ひび割れが進行し、自然電位が-700 mV (vs.CSE) 程度に低下した供試体を順次回収し、コンクリート表面の隆起量を測定した後に解体し、内部の鉄筋の腐食量を測定した。解体時期は、暴露 43 ヶ月、47 ヶ月、54 ヶ月とした。各測定の内容と方法を以下に述べる。

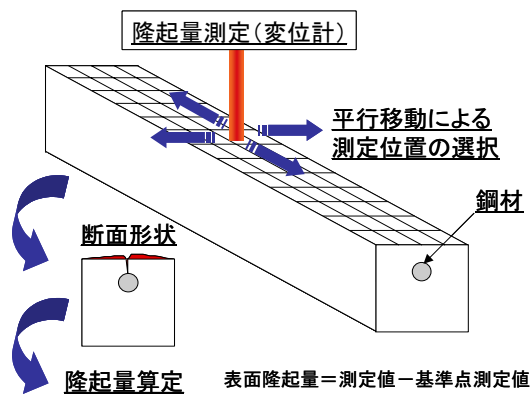
2.3.1 腐食ひび割れ発生状況の観察

腐食ひび割れの発生状況の確認は、およそ 6 ヶ月に 1 回の頻度で行った。腐食ひび割れの確認は目視により行い、発生が確認された場合にはその位置を図面に記録し、クラックスケールを用いてひび割れ幅を測定した。測定の際にひび割れの進展を確認し、ひび割れ幅については同じ箇所を測定して、図面に追記した。

2.3.2 自然電位の測定

自然電位の測定は、腐食ひび割れの確認と同時に、およそ 6 ヶ月に 1 回の頻度で行い、経時変化を記録した。

図-2 に自然電位の測定方法を示す。測定は、図-2 にあるように、電位差計のプラス端子とコンクリート内部の鉄筋の一端をリード線を介して接続し、マイナス端子にリード線を介して照合電極を接続して行った。照合電極はかぶり側コンクリート表面の鉄筋直上に接触させて測定した。測定時には、測定面を水道水で湿潤状態にし、電位が安定した時点で記録した。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にはスポンジを着け、飽和水酸化カルシウム溶液を染み込ませて測定した。



測定点は10mmメッシュの交点

図-3 コンクリート表面隆起量の測定方法
Measurement of Concrete Surface Rising

測定は、かぶり 20mm 側の表面被覆をしていない 100×800mm の暴露面で、この範囲の鉄筋直上を 25mm 間隔で照合電極を移動させて測定した。

2.3.3 コンクリート表面隆起量の測定

暴露 43 ヶ月、47 ヶ月に供試体を回収し、かぶり 20mm 側の面の表面隆起量を測定した。54 ヶ月暴露の供試体は、暴露途中の暴風雨により一部破損（供試体左端から 250～550mm の間の 300mm が欠損）したため、表面隆起量の測定は行わなかった。

図-3 にコンクリート表面隆起量の測定方法を示す。コンクリート表面の隆起量は、供試体表面を 10mm メッシュに区切り、その交点に変位計（ダイヤルゲージ）の先端をあてて測定した値から、損傷の見られなかった供試体端部 20 点の測定値の平均を基準値として差し引いて求めた。

2.3.4 解体による腐食量の測定

暴露 43 ヶ月、47 ヶ月、54 ヶ月に供試体を回収し、解体して内部の鉄筋を取り出して腐食量の測定を行った。ただし、54 ヶ月暴露の供試体は、暴露途中の暴風雨により一部破損（供試体左端から 250～550mm の間の 300mm が欠損）した状態で解体した。

解体して取り出した鉄筋は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」を参考にして、10%クエン酸二アンモニウム溶液（液温 60℃）に 7.5 時間浸漬して腐食生成物を除去した。

図-4 に腐食生成物を除去した鉄筋の断面形状測定方法を示す。断面形状は変位計により深さ方向の距離を、ひとつの測定断面を 36 分割し、鉄筋を 10 度ごとに回転させて測定した。測定断面は鉄筋の長手方向に約 20mm 間隔とした。

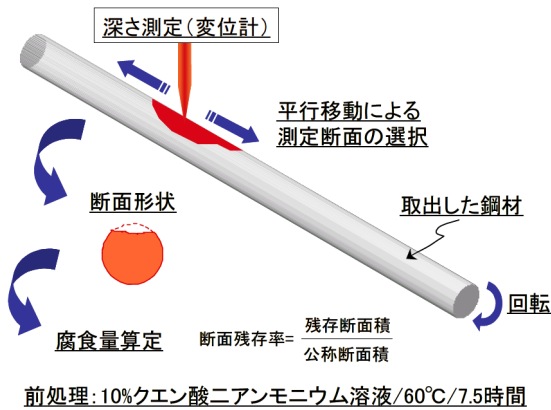


図-4 鉄筋断面形状の測定方法
Measurement of Steel Bar Cross-Section

この測定の結果得られた断面積を残存断面積とし、これを鉄筋の公称断面積で除したものを断面残存率として、鉄筋の腐食量を表す指標とした。

3. 実験結果および考察

3.1 腐食ひび割れと自然電位の関係

図-5 に 47 ヶ月暴露供試体における、腐食ひび割れの発生状況と自然電位分布の経時変化を並べて示す。また、図-6 に 47 ヶ月暴露供試体における、ひび割れありとなしの箇所での自然電位の経時変化を示す。

自然電位は飽和硫酸銅電極電位 (vs.CSE) に換算して表す。また、これ以降の供試体区分は、暴露後の解体時期 (43 ヶ月、47 ヶ月、54 ヶ月暴露) で表すものとする。

腐食ひび割れは、供試体 3 体ともに暴露 18 ヶ月の時点で確認され、このときの自然電位は、-450~-600mV (vs.CSE) 程度であった。腐食ひび割れは、暴露を継続するほどその発生範囲が広がり、ひび割れ幅も増大している。例えば 54 ヶ月暴露供試体では、暴露 18 ヶ月でひび割れ幅が 0.04mm、36 ヶ月で 0.4mm、54 ヶ月で 0.75mm であった。解体時の腐食ひび割れ幅の最大値は 43 ヶ月暴露供試体で 0.7mm、47 ヶ月暴露供試体で 0.9mm、54 ヶ月暴露供試体で 0.75mm であった。

図-5、図-6 から、自然電位が相対的に卑な位置と、腐食ひび割れの発生位置が一致している。これは、43 ヶ月、54 ヶ月暴露供試体でも同様であった。

図-7 に 54 ヶ月暴露供試体で、比較的幅の広い腐食ひび割れが見られた位置における、ひび割れ幅と自然電位の関係を示す。自然電位が卑な位置と腐食ひび割れの発生位置は一致するが、自然電位と腐食ひび割れ幅には明確な関係が見られない。

なお、暴露開始時の自然電位は、43 ヶ月暴露供試体

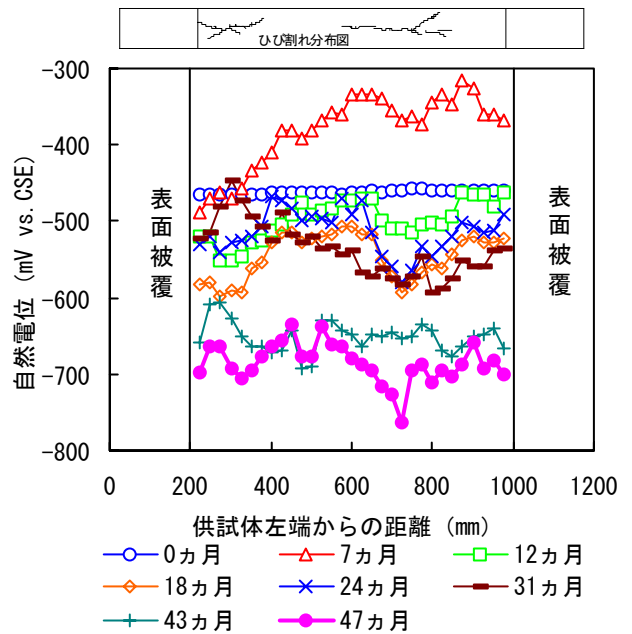


図-5 腐食ひび割れと自然電位の分布 (47 ヶ月暴露供試体)
Crack and Halfcell Potential (47Months exposed)

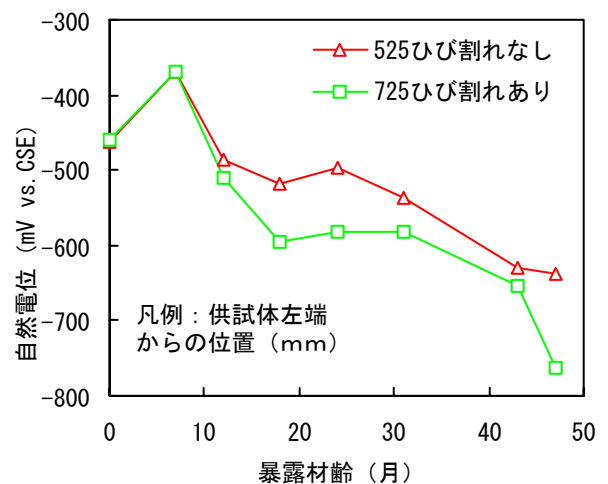


図-6 自然電位の経時変化 (47 ヶ月暴露供試体)
Change of Halfcell Potential (47Months exposed)

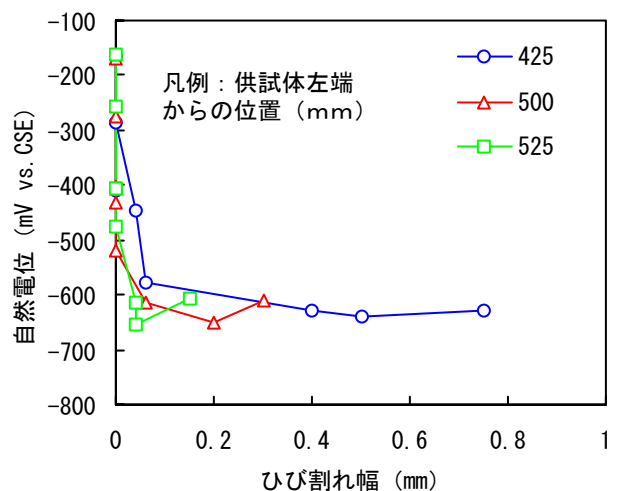


図-7 腐食ひび割れ幅と自然電位 (54 ヶ月暴露供試体)
Crack Width and Halfcell Potential (54Months exposed)

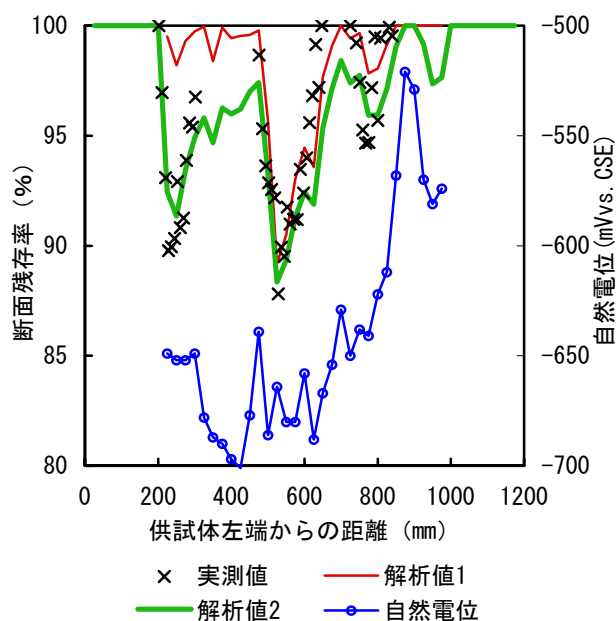


図-8 断面残存率と自然電位の分布 (43ヶ月暴露供試体)
Residual Cross-Section Ratio of corroded Steel Bar and
Halfcell Potential (43Months exposed)

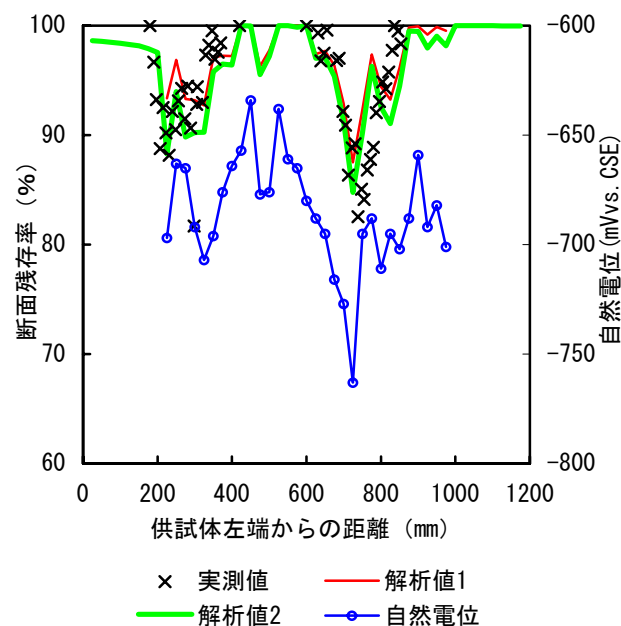


図-9 断面残存率と自然電位の分布 (47ヶ月暴露供試体)
Residual Cross-Section Ratio of corroded Steel Bar and
Halfcell Potential (47Months exposed)

で-460 mV、47ヶ月暴露供試体で-520 mV、54ヶ月暴露供試体で-400mV (vs.CSE)程度で、腐食ひび割れ発生時の自然電位と同程度に卑であったがひび割れは見られず、暴露開始後に貴になり、腐食の進行とともに卑になる。暴露初期に卑になるのは、コンクリート中の溶存酸素が少ないことなどの影響と考えられる。

3.2 断面残存率と自然電位の関係

図-8、図-9、図-10 にそれぞれ 43ヶ月、47ヶ月、54ヶ月暴露供試体中の鉄筋の断面残存率と自然電位の関係を示す。ここで示す断面残存率の解析値は、腐食の電気化学的理論に基づき、以下のようにして算出した値である。

連続した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において、鋼材上のある任意の2点*i*と*j*の間の電流は、2点間の電位差との比抵抗により決まる。そのため、*i*における腐食電流密度は、個々の電流の総和から得られ、式(1)で表される。

$$I_i = \frac{1}{S_i} \sum_{j=1}^n \frac{\delta E_{i,j}}{\rho \cdot \delta L_{i,j}} S_j \quad (1)$$

ここに、 I_i : *i*点の腐食電流密度(mA/cm²)

$\delta E_{i,j}$: *i*点と*j*点との電位差(mV)

$\delta L_{i,j}$: *i*点と*j*点との距離(cm)

ρ : 比抵抗(Ω cm)

S_j : *j*点で代表される部分の鉄筋の面積(cm²)

S_i : *i*点で代表される部分の鉄筋の面積(cm²)

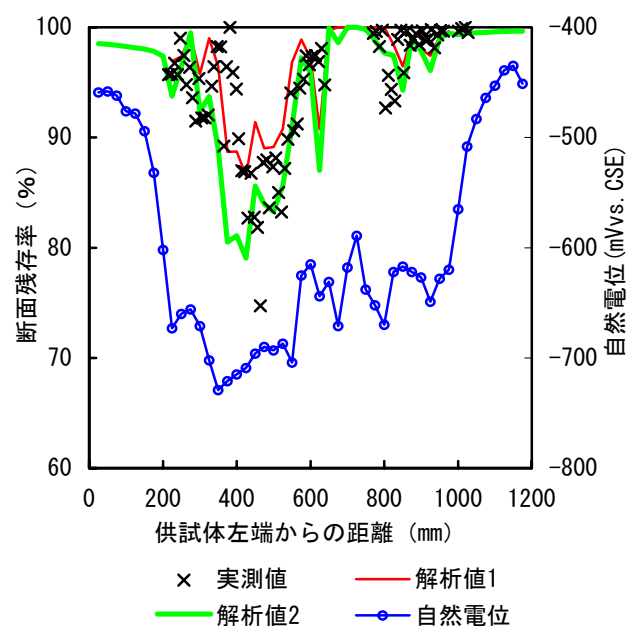


図-10 断面残存率と自然電位の分布 (54ヶ月暴露供試体)
Residual Cross-Section Ratio of corroded Steel Bar and
Halfcell Potential (54Months exposed)

また、鉄筋の腐食量は、式(2)に示すファラデーの法則より得られる。

$$m = \frac{I_i \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (2)$$

ここに、 m : 腐食量 (mg/cm²)

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残存率は、式(3)により計算した。

$$A_L = \left(1 - \frac{1}{R} \frac{m}{\gamma_{Fe}}\right)^2 \times 100 \quad (3)$$

- ここに、AL : 断面残存率(%)
- R : 鉄筋半径 (cm)
- γ_{Fe} : 鉄の密度、7870(mg/cm³)

図-8 には、断面残存率の実測値と自然電位から算出した解析値、および暴露 43 カ月での自然電位を示している。解析値 1 は、比抵抗を 2000 Ωcm と仮定した場合の結果であるが、表面被覆のない暴露面（供試体左端から 200mm～1000mm の 800mm の区間）で実測した自然電位に基づき算出したもので、供試体両端にある表面被覆 200mm の範囲の自然電位は全く考慮していない。この解析値 1 と実測値を比べると、供試体中央付近ではよく一致しているが、測定面端部（供試体左端から 250mm および 800mm 付近）では差がある。これは供試体両端部 200mm の範囲を表面被覆し、自然電位の測定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、実際よりもカソードの範囲が小さく評価されているためと考えられる。

そのため、供試体両端の表面被覆を施している部分がカソード状態であることを考慮して計算する必要がある。解析値 2 は、比抵抗を 3000 Ωcm、供試体両端の表面被覆下の自然電位を -400mV (vs.CSE) と仮定した結果で、解析値 1 よりも実測値を評価できている。

図-9 は 47 カ月、図-10 は 54 カ月暴露供試体の鉄筋の断面残存率を、この解析手法を用いて計算した結果である。解析値 1 は供試体両端にある表面被覆 200mm の範囲の自然電位は全く考慮しないで、47 ヶ月供試体の比抵抗を 1500 Ωcm、54 ヶ月供試体は比抵抗を 2000 Ωcm と仮定した場合である。一

方、解析値 2 は供試体両端の表面被覆下の自然電位を -400mV (vs.CSE) と仮定し、47 カ月暴露供試体は比抵抗を 1500 Ωcm、54 カ月暴露供試体は 2000 Ωcm とした場合で、断面残存率の実測値とよく一致する。比抵抗と表面被覆部分のカソード状態を適切に設定すれば、自然電位の測定値によって鉄筋の断面残存率、すなわち腐食量を推定できる。これらの結果から、本実験で用いた供試体の比抵抗は最終的に 1500～3000 Ωcm 程度であったと考えられ、腐食速度が早い状況であった⁵⁾と考えられる。

この解析手法では、マイクロセル腐食のみの局所的な自然電位の経時変化は考慮しておらず、マクロセル腐食を含めた測定点間の自然電位の差に着目しているが、本手法を用いて、自然電位の測定値から鉄筋の腐食量を推定できる。また、表面被覆がある場合には、その部分をカソード範囲として評価することで、更に精度よく鉄筋の腐食量を推定できる。

3.3 腐食量とひび割れ幅の関係

表-2、図-11 は、3 体の供試体各々で最も腐食量が多かった位置の累積腐食量（解析値）の経時変化を示している。図-11 の凡例で、例えば「暴露 43 カ月-525」とは、

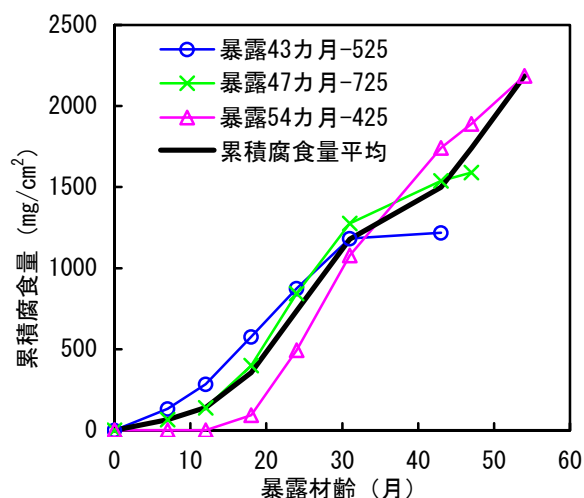


図-11 累積腐食量（解析値）の経時変化
Changes for Total Amount of Steel Bar Corrosion

表-2 累積腐食量（解析値）の経時変化
Changes for Total Amount of Steel Bar Corrosion

暴露材齢(月)		0	7	12	18	24	31	43	47	54
供試体-位置										
暴露43カ月-525	mg/cm ²	0	131	285	576	875	1184	1218	-	-
暴露47カ月-725		0	65	138	399	843	1276	1539	1590	-
暴露54カ月-425		0	0	0	93	494	1079	1742	1889	2186
累積腐食量平均		0	65	141	356	737	1180	1500	1740	2186
腐食速度	mg/cm ² /月	0	9	15	36	63	63	27	60	64

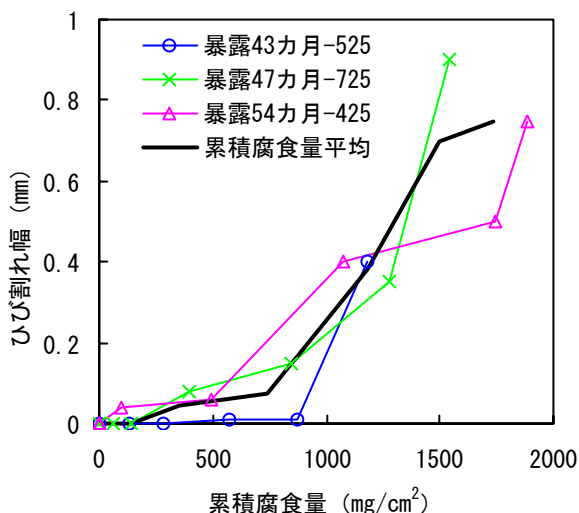


図-12 累積腐食量とひび割れ幅
Total Amount of Steel Bar Corrosion and Crack Width

43 カ月暴露供試体の左端から 525mm の位置における累積腐食量の解析値を表している。

腐食ひび割れは、3 体全ての供試体で、暴露材齢 18 カ月の時点で確認されていることから、暴露材齢 12～18 カ月の間に発生している。この期間の累積腐食量は、138～576mg/cm² である。また、腐食ひび割れ発生前の腐食速度は 15～36mg/cm²/月程度であるが、腐食ひび割れ発生後は 60mg/cm²/月程度に、数倍増加していることもわかる。さらに、腐食ひび割れ発生後の腐食速度は、急激に増加するのではなく、ほぼ一定の速度を維持していると考えられる。

図-12 は、累積腐食量とひび割れ幅の関係を示している。腐食ひび割れ発生後のひび割れ幅は累積腐食量の増加にともない、急激に増加することがわかる。本実験のかぶり 20mm での条件では、腐食ひび割れ発生後の腐食量 150～250 mg/cm² の増加対し、ひび割れ幅が 0.1mm 程度広がると考えられる。

3.4 断面残存率とコンクリート表面隆起量の関係

図-13、図-14 に 43 ヶ月暴露供試体、47 ヶ月暴露供試体における、鉄筋の断面残存率とコンクリート表面の隆起量の関係を示す。コンクリート表面の隆起量は鉄筋直上での測定値のみ示している。各図上部の図形は、解体時の腐食ひび割れ発生状況である。図-13、図-14 から、表面隆起量が最大になる位置と断面残存率が最小になる位置が一致することがわかる。

図-15 は表面隆起量と断面残存率の関係を示している。相関係数の検定を行った結果、統計的な相関が認められることから、表面隆起量の実測値により断面残存率を推定できると考えられる。

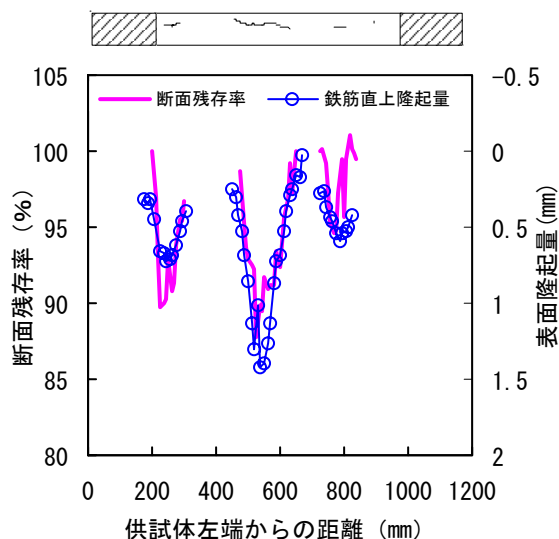


図-13 表面隆起量と断面残存率の分布 (43 ヶ月暴露供試体)
Distribution for Amount of Surface Rising and Residual Cross-Section Ratio (43Months exposed)

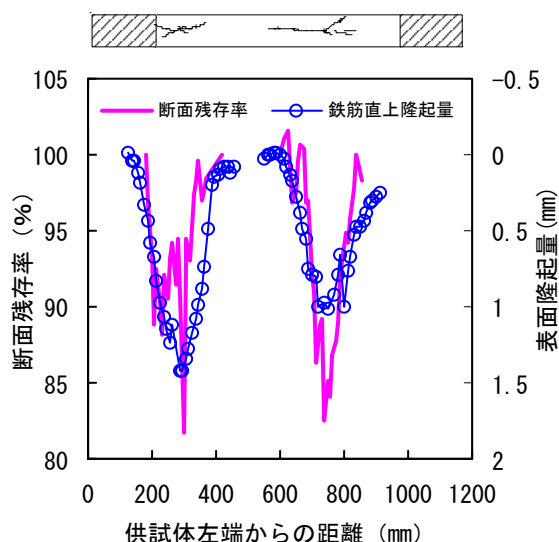


図-14 表面隆起量と断面残存率の分布 (47 ヶ月暴露供試体)
Distribution for Amount of Surface Rising and Residual Cross-Section Ratio (47Months exposed)

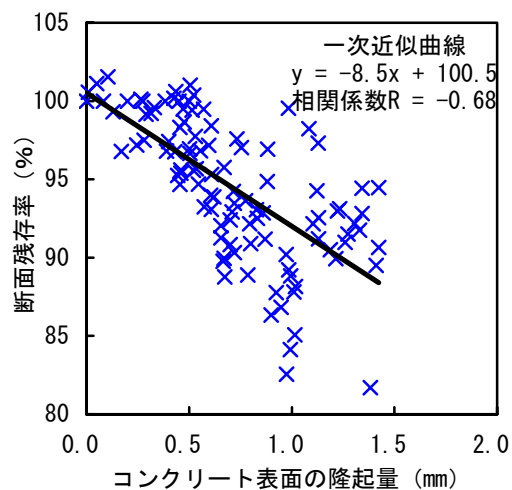


図-15 表面隆起量と断面残存率
Amount of Surface Rising and Residual Cross-Section Ratio of corroded Steel Bar

ただし、鉄筋腐食による表面隆起量は、かぶりと鉄筋径の影響を大きく受けると考えられるため、今後これらをパラメータにした検討を加える必要がある。

4. まとめ

本研究は、塩害による鋼材の腐食現象を電気化学的にとらえ、腐食ひび割れ発生前後の鋼材の腐食量を定量的に評価することを目的に、海洋環境に供試体を暴露する実験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1)自然電位とひび割れ幅の関係

自然電位が卑な位置と腐食ひび割れの発生位置は一致するが、自然電位と腐食ひび割れ幅には明確な関係が見られない。

(2)自然電位と腐食量の関係

腐食量を定量的に評価することを目的に提案した本解析手法を用いることにより、自然電位の実測値から腐食量を評価できる。また、表面被覆がある場合には、その範囲をカソード状態として適切に評価することで、表面被覆近傍の鉄筋の腐食量を推定できる。

(3)腐食速度

腐食ひび割れ発生前の腐食速度は $15\sim 36\text{mg/cm}^2/\text{月}$ 程度、腐食ひび割れ発生後は $60\text{mg/cm}^2/\text{月}$ 程度であった。腐食ひび割れ発生後の腐食速度は急激に増加せず、ほぼ一定の速度に収束するものと考えられる。

(4)腐食量とひび割れ幅の関係

自然電位とひび割れ幅の経時変化を測定し、腐食量を定量的に評価する本解析手法を用いることで、腐食量とひび割れ幅の関係を推定できる。本実験における供試体

では、腐食ひび割れ発生時の腐食量は、 $138\sim 576\text{mg/cm}^2$ と推定される。また、本実験のかぶり 20mm での条件では、腐食ひび割れ発生後のひび割れ幅は、腐食量 $150\sim 250\text{mg/cm}^2$ の増加に対し、 0.1mm 程度広がると推定される。

(5)断面残存率とコンクリート表面隆起量の関係

表面隆起量が最大になる位置と断面残存率が最小になる位置は一致する。また、表面隆起量と断面残存率には統計的な相関が認められるため、表面隆起量の測定値から断面残存率を推定できると考えられる。

ただし、鉄筋腐食による表面隆起量は、かぶりと鉄筋径の影響を大きく受けると考えられるため、今後これらをパラメータにした検討を加える必要がある。

本実験では、今回の供試体仕様の他に、かぶりと水セメント比の異なる供試体も同時に暴露し、現在も暴露を継続している。これらの実験結果が得られ次第、新たな知見を加える予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 維持管理編，pp.102-104.
- 2) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 構造性能照査編，pp.102-104.
- 3) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 施工編，pp.24-28.
- 4) 武田均，Ahmet GOKCE，堀口賢一，丸屋剛：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，大成建設技術センター報，第35号，pp.7.1-7.5，2002.
- 5) 小林一輔，小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993.