

報告 鉄筋腐食非破壊検査法の実構造物への適用性について

一徳元^{*1}・平野利光^{*2}・武藤常陽^{*3}・藤井誠^{*4}

要旨：海浜に位置する実構造物を対象に，自然電位，表面電位差，コンクリート比抵抗及び分極抵抗を測定し，鉄筋の実際の腐食状況と照合することにより非破壊検査法の適用性を検証した。検証にあたっては，かぶりコンクリートの影響評価や自然電位，表面電位差とコンクリート表面の比抵抗との組合せによる鉄筋腐食判定の精度向上を試みた。また，屋外での現地検査において信頼性の高い測定値を得るために必要な散水状態が保持できる限界時間について考察した。

キーワード：非破壊検査，鉄筋腐食，実構造物，劣化診断，塩害

1. はじめに

塩害環境下での鉄筋腐食が懸念されるコンクリート構造物を維持管理するためには，ひびわれや浮き，錆汁等の兆候がコンクリート表面に顕在化する以前に鉄筋腐食の発生やその進行状況を把握することが重要である。簡便に実施できて鉄筋腐食状況を精度良く判定できる非破壊検査手法の確立を目的として，実構造物を対象に主に電気化学的手法による調査・試験を実施し適用性を検証した結果を報告する。

2. 調査・試験方法

2. 1 調査・試験概要

調査・試験は，いずれも海岸に隣接する2つの発電所の合計9箇所で行った。1調査箇所の見付面積はおおよそ2㎡である。調査・試験対象箇所の状況を表-1に示す。実施時期は，A発電所では平成10年8月，またB発電所では同年11月である。

2. 2 調査・試験方法

各調査箇所における調査・試験項目と測定点の模式図を図-1に示す。

表-1 調査・試験対象箇所の状況

発電所 設備名 経過年数	No.	部位	環境 条件	外観状況
A発電所 荷揚機橋 22年	1	杭頭側面	飛沫帯	ジャンカ（部分的，軽微）
	2	杭頭側面	干満帯	浮き，ひびわれ，錆汁（広範囲）
	3	梁側面	飛沫帯	膨張ひびわれ（鉄筋上）
	4	梁側面	飛沫帯	縦ひびわれ（鋼管杭周辺）
	5	梁側面	飛沫帯	縦ひびわれ（鋼管杭周辺）
	6	スラブ下面	飛沫帯	浮き，ひびわれ，錆汁（広範囲）
B発電所 取水口 24年	1	橋脚側面	干満帯	ハンチ筋露出（多数）
	2	通路スラブ上面	飛沫帯	劣化なし
	3	カーブウォール杭頭	飛沫帯	浮き，ひびわれ（広範囲）

凡 例

●	コンクリート比抵抗測定，分極抵抗測定	90点
△	含水率測定	15点
○	かぶりコンクリートによる電位変動	2点

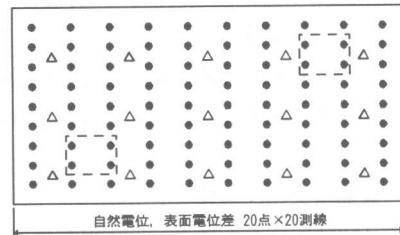


図-1 調査・試験位置模式図

*1 九州電力㈱総合研究所研究員（正会員）

*2 九州電力㈱総合研究所主幹研究員（正会員）

*3 西日本技術開発㈱臨海開発部海岸港湾計画課課長（正会員）

*4 西日本技術開発㈱臨海開発部火力・原子力土木室火力土木課

(1)自然電位測定

照合電極に回転式鉛電極を使用して自然電位を測定した。測定された電位は、銅-硫酸銅電極基準に換算した。

(2)表面電位差測定

2 個の照合電極のうち一方をコンクリート表面に固定し、他方の回転式鉛電極を移動させて、表面電位差を測定した。測定された表面電位差を、それぞれの調査箇所で最も貴な電位に対する電位差に換算した。

(3)コンクリート比抵抗測定

事前に探査した鉄筋直上のコンクリート表面で交流 4 電極法によりコンクリート比抵抗を測定した。

(4)分極抵抗測定

交流インピーダンス法により分極抵抗を測定した。測定法は電流分散抑制機能を有する定電流 2 重パルス重畳方式（低周波数 0.25Hz および高周波数 10Hz）である。分極抵抗値はインピーダンスの差から算出した。

(5)含水率測定

噴霧器でコンクリート表面を十分に散水した後、非破壊検査測定直前に含水率を測定した。測定は、コンクリートの表面と内部 0~2cm 及び 7~9cm の計 3 深度で実施した。コンクリート表面の測定には高周波容量式水分計を、また内部の測定には電気抵抗式水分計を使用した。

(6)かぶりコンクリートによる電位変動

コンクリート表面とかぶり厚の 1/3, 2/3 をはつり除去した位置の計 3 深度で自然電位を測定し、コンクリート表面からの電位差を算出した。

(7)鉄筋腐食状況調査

一連の非破壊検査を終えた後に調査範囲のかぶりコンクリートをはつり取り、実際の鉄筋腐食状況を調査した。露出した鉄筋について 2cm ピッチ（総データ数 6,039 点）で腐食グレードを目視により判定した。腐食グレードの判定は、表-2 を参考に区分した。

表-2 腐食グレード区分

腐食グレード	鉄筋の状態
I	腐食がなく黒皮の状態。全く錆のないもの。
II	点錆。部分的（小面積）に浮き錆発生。
III	鉄筋の全周または全長にわたって浮き錆発生。
IV	断面欠損。

3. 調査・試験結果

3.1 自然電位と鉄筋腐食の関係

鉄筋上のコンクリート面で測定された自然電位の分布を腐食グレード別に図-2 に示す。また、かぶりコンクリートの 1/3, 2/3 をはつり除去した時の自然電位の変動を表-3 に示す。同表中のかぶり 2/3 除去におけるコンクリート表面からの電位差を用いて自然電位を補正した

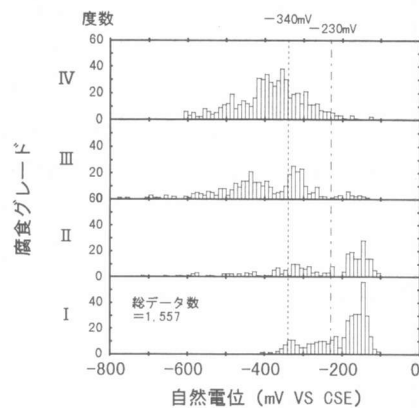
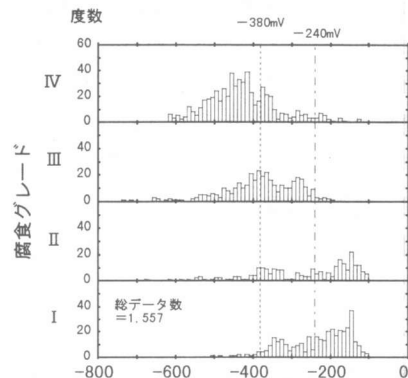


図-2 自然電位分布



かぶりの影響により補正した自然電位 (mV VS CSE)

図-3 かぶりの影響により補正した自然電位分布

場合の分布を図-3に示す。この補正によって、グレードⅢで自然電位のばらつきが減る傾向が見られた。

しかしながら、自然電位の発生分布は、ⅠとⅡ、ⅢとⅣで類似しているため、自然電位による健全鉄筋(Ⅰ)と軽微な腐食鉄筋(Ⅱ)との区分、全面的な腐食鉄筋(Ⅲ)と断面欠損鉄筋(Ⅳ)との区分は難しい。このため、以下ではⅠ・Ⅱのグループ(おおむね健全)とⅢ・Ⅳのグループ(明瞭な腐食)に大別して考察する。

かぶりコンクリートの影響を考慮しない図-2の場合で自然電位が-230mV以上の部位、考慮した図-3の場合で-240mV以上の部位では90%以上が腐食グレードⅠ・Ⅱと判定された。逆に、図-2で-340mV以下、図-3で-380mV以下の部位では90%以上が腐食グレードⅢ・Ⅳと判定された。以上をまとめて表-4に示す。この結果は、表-5のASTMの評価区分¹⁾等既往の評価基準にも対応している。

表-3 かぶりコンクリートによる自然電位変動

発電所	No.	平均かぶり厚さ (mm)	コンクリート表面からの電位差 (mV)	
			かぶり 1/3除去	かぶり 2/3除去
A	1	65	-56	-60
	2	63	-15	-10
	3	88	-2	-18
	4	101	0	5
	5	132	-6	-4
	6	44	-84	-101
B	1	91	32	44
	2	70	6	5
	3	42	-30	-62

表-4 自然電位による鉄筋腐食性評価

	腐食グレードⅠ・Ⅱ の割合90%以上	腐食グレードⅢ・Ⅳ の割合90%以上
測定値	> -230mV	≤ -340mV
かぶり補正値	> -240mV	≤ -380mV

(銅-硫酸銅電極基準)

表-5 自然電位によるASTM評価区分

鉄筋腐食の可能性	90%以上の確率で腐食なし	不確定	90%以上の確率で腐食あり
自然電位 (E)	$E > -200\text{mV}$	$-200\text{mV} \geq E > -350\text{mV}$	$E \leq -350\text{mV}$

(銅-硫酸銅電極基準)

3. 2 表面電位差と鉄筋腐食の関係

表面電位差と鉄筋の腐食グレードとの関係を図-4に示す。表面電位差が-150mV以下になる部位では、90%以上で腐食グレードⅢ・Ⅳと判定された。一方、顕著な劣化が調査箇所全面に及ぶA発電所No.2のデータを除けば、表面電位差が-30mV以上の部位では80%以上が腐食グレードⅠ・Ⅱと判定された。ただし、この結果は調査面積を約2㎡とした場合であり、調査範囲が更に小さい場合には腐食が発生していても電位差が生じないことも予想される。以上をまとめて表-6に示す。

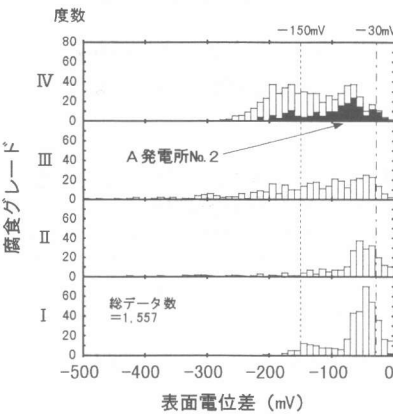


図-4 表面電位差と腐食グレードとの関係

表-6 表面電位差による鉄筋腐食性評価

腐食グレードⅠ・Ⅱ の割合80%以上*	腐食グレードⅢ・Ⅳ の割合90%以上
> -30mV	≤ -150mV

* A 発電所No.2を除く

3. 3 コンクリート比抵抗と鉄筋腐食の関係

コンクリート比抵抗と腐食グレードとの関係を図-5 に示す。同図より鉄筋腐食はコンクリート比抵抗の低下に伴って重度な腐食グレードへ移行しており、比抵抗が $5k\Omega\cdot\text{cm}$ 以下の部位では 90% 以上が腐食グレードⅣに分類された。一方、比抵抗が $75k\Omega\cdot\text{cm}$ を超える部位では、90% 以上が腐食グレードⅠ・Ⅱと判定された。以上をまとめて表-7 に示す。

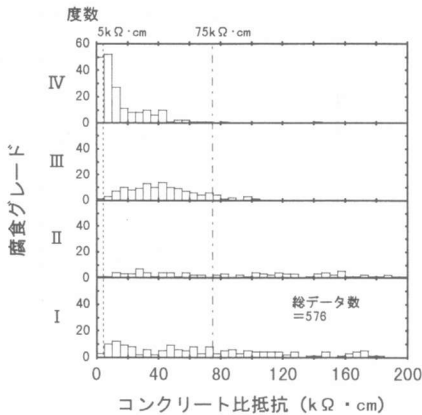


図-5 コンクリート比抵抗と腐食グレードとの関係

表-7 コンクリート比抵抗による鉄筋腐食性評価

腐食グレードⅠ・Ⅱの割合90%以上	腐食グレードⅣの割合90%以上
$>75k\Omega\cdot\text{cm}$	$\leq 5k\Omega\cdot\text{cm}$

3. 4 分極抵抗測定結果

測定された分極抵抗は、A発電所では $0.001\sim 5.4k\Omega\cdot\text{cm}^2$ (平均 $0.8k\Omega\cdot\text{cm}^2$) であったのに対し、B発電所では $10.6\sim 39.0k\Omega\cdot\text{cm}^2$ (平均 $25.1k\Omega\cdot\text{cm}^2$) と大きく異なった。同時に計測されるコンクリート比抵抗値も、A発電所では $0.1\sim 129.4k\Omega\cdot\text{cm}$ (平均 $10.3k\Omega\cdot\text{cm}$)、B発電所では $0.03\sim 1.5k\Omega\cdot\text{cm}$ (平均 $0.6k\Omega\cdot\text{cm}$) で

大きく異なっている。また、B発電所では、半数以上の測点で測定装置付属ソフトによる分極抵抗値の計算ができなかったため、本報告では鉄筋腐食評価に分極抵抗測定結果を用いなかった。これらの原因について現状では明らかでないため、今後更に調査を重ねて検討したい。

3. 5 組合せによる鉄筋腐食性評価

自然電位とコンクリート比抵抗の相関と鉄筋腐食状況の関係を図-6 に示す。用いた自然電位値は、かぶりコンクリートによる電位補正を行わない値である。同図より鉄筋の腐食状況を 90%以上の適合率で判定できるような領域分けを行うことにより、表-8 のような組合せ評価区分を得た。同様にして、表面電位差とコンクリート比抵抗の相関と鉄筋腐食状況を示す図-7 より得られた領域区分を表-9 に示す。

これらの領域区分を適用した際の判定割合を表-10 に示す。自然電位とコンクリート比抵抗の組合せによれば、78%の部位について 90%以上の高い精度での判定が可能であるが、表面電位差とコンクリート比抵抗の組合せでは、精度の高い判定が保留される不確定部位が 45%残る。

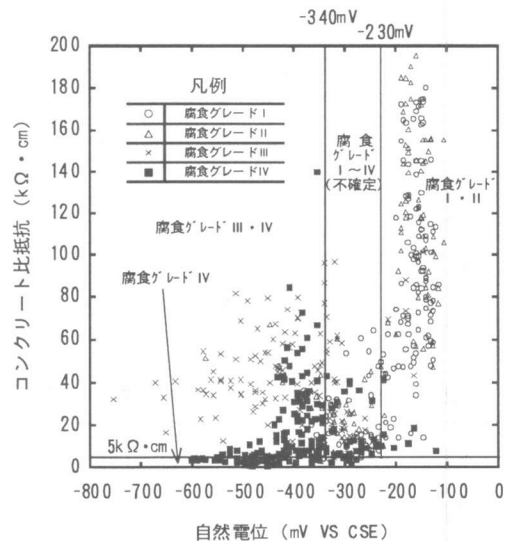


図-6 自然電位とコンクリート比抵抗との関係

表-8 自然電位とコンクリート比抵抗
による鉄筋腐食性評価

コンクリート 比抵抗 ($k\Omega \cdot cm$) \ 自然電位 (mV VS CSE)	≤ -340	$-340 \sim -230$	> -230
> 5	Ⅲ・Ⅳ (92.1%)	不確定	Ⅰ・Ⅱ (92.1%)
≤ 5	Ⅳ (90.9%)		

下段 () の数値は領域内の適合率を示す。

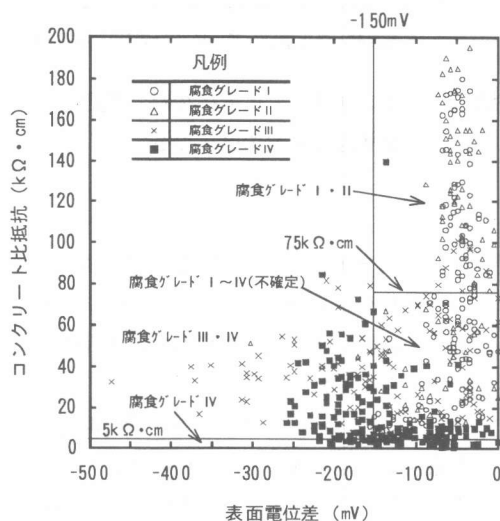


図-7 表面電位差とコンクリート
比抵抗との関係

表-9 表面電位差とコンクリート比抵抗
による鉄筋腐食性評価

コンクリート 比抵抗 ($k\Omega \cdot cm$) \ 表面電位差 (mV)	≤ -150	> -150
> 75	Ⅲ・Ⅳ (94.2%)	Ⅰ・Ⅱ (93.0%)
$5 \sim 75$		不確定
≤ 5	Ⅳ (90.9%)	

下段 () の数値は領域内の適合率を示す。

表-10 領域区分と判定割合

領域区分	自然電位とコン クリート比抵抗 との組合せ	表面電位差とコン クリート比抵抗 との組合せ
判定領域	78.0% 適合71.7% 不適合6.3%	55.5% 適合51.7% 不適合3.8%
Ⅰ～Ⅳ (不確定領域)	22.0%	44.5%

3. 6 測定値の経時変動

非破壊検査にあたっては噴霧器でコンクリート表面に散水した後に各種の測定を行ったが、屋外における現地測定では散水の前後でコンクリート表面の湿潤状態は刻々変化する。それに伴って測定値が変動する様子を見るために、B発電所 No. 3 調査箇所 の 12 点で散水前後の各試験値の経時変動について測定した。その際のコンクリート含水率の変動を図-8 に示す。

(1) 自然電位の変動

自然電位の変動を図-9 に示す。比較のために同じ 12 点で散水直後の測定を 4 回実施した時の試験値のばらつきを調査したところ、測定の度に自然電位値は標準偏差で 11mV 程度のばらつきがあった。一方、散水後の経時変動は平均値で見ると小さいが、30 分を超えると各点における測定値のばらつきが大きくなる。

(2) 表面電位差の変動

表面電位差の変動を図-10 に示す。散水後の経時変動は小さく測定値のばらつきも散水 30 分後までは小さい。

(3) コンクリート比抵抗の変動

コンクリート比抵抗の変動を図-11 に示す。比抵抗値は散水後増大していき、2 時間後には散水前と変わらない傾向を示した。30 分後の平均値で散水直後から $6k\Omega \cdot cm$ 増加しており、これは散水直後の測定のばらつきと比較しても無視できない。コンクリート比抵抗は、散水直後速やかに測定しなければならない。

4. まとめ

電気化学的手法による鉄筋腐食非破壊検査法を海浜に位置する実構造物へ適用した結果、以下の成果を得た。

- 1) 自然電位 1,557 点の測定結果から、銅－硫酸銅電極基準で $-340mV$ 以下では 90% 以上が腐食グレードⅢ・Ⅳ、 $-230mV$ 以上では 90% 以上がグレードⅠ・Ⅱであった。
- 2) 表面電位差 1,557 点の測定結果から、 $-150mV$ 以下で 90% 以上がグレードⅢ・Ⅳ

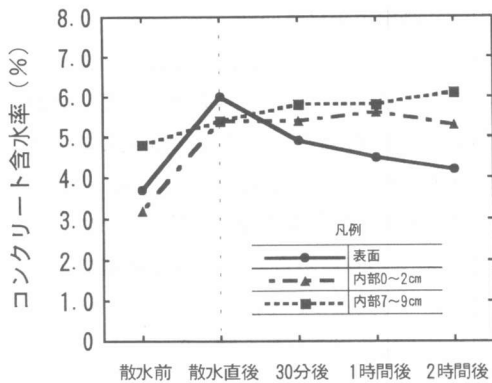


図-8 コンクリート含水率の経時変動

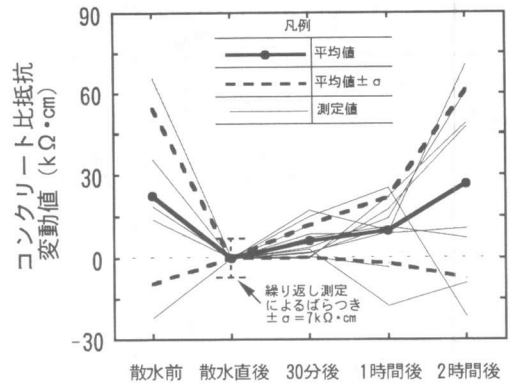


図-11 コンクリート比抵抗の経時変動と繰り返し測定によるばらつき

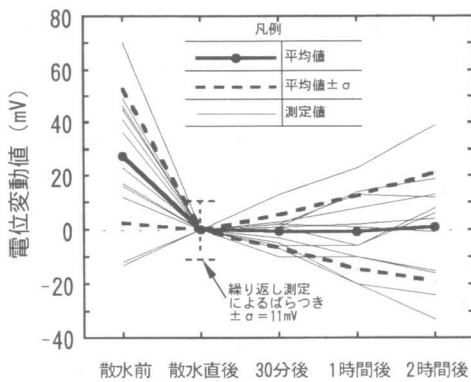


図-9 自然電位の経時変動と繰り返し測定によるばらつき

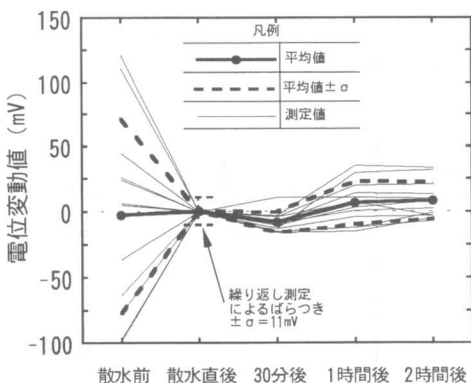


図-10 表面電位差の経時変動と繰り返し測定によるばらつき

であった。

3) コンクリート比抵抗 576 点の測定結果から、 $5k\Omega\cdot\text{cm}$ 以下では 90% 以上がグレードⅣ、 $75k\Omega\cdot\text{cm}$ 以上では 90% 以上がグレードⅠ・Ⅱであった。

4) 自然電位測定とコンクリート比抵抗測定との組合せによって、約 8 割の部位について 90% 以上の精度で鉄筋の腐食状況を判定することができた。また、表面電位差測定とコンクリート比抵抗測定との組合せから、約半数の部位で鉄筋の腐食状況を判定することができた。

5) 自然電位および表面電位差の散水後の経時変動は、30 分を超えるとばらつきが大きくなる。コンクリート比抵抗は、30 分後には平均値で見ても無視できない変動を示した。

参考文献

- 1) ASTM C876-91 : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete