論文　干満帯に暴露した各種セメントを用いたコンクリート中鉄筋の自然電位および分極抵抗と鉄筋腐食の関係

審良　善和[*1]・岩波　光保[*2]・山路　徹[*3]・石中　正人[*4]

要旨：湿潤環境に曝されたコンクリート構造物の電気化学的手法による鉄筋腐食診断の妥当性を検証するため，海水の影響を受け，また，湿潤環境となる干満帯に長期暴露した各種セメントを用いたコンクリート供試体を用いて，自然電位および分極抵抗を測定し，鉄筋腐食結果と比較検討した。結果を以下に示す。1）セメントの種類に係わらず自然電位および分極抵抗はほぼ同様な挙動を示す。2）自然電位は，構造物が湿潤環境にある場合，時間の経過とともに卑化する傾向を示す。3）鉄筋周囲に供給される酸素量が少ない環境では，分極抵抗から計算される腐食電流密度が実際の速度よりも大きな値を示す可能性がある。

キーワード：自然電位，分極抵抗，鉄筋腐食，塩害，干満帯

1. はじめに

塩害によるコンクリート構造物の劣化は，塩化物イオンの浸透に伴う鉄筋腐食である。鉄筋腐食は，構造物の耐力低下につながる非常に重要な問題である。したがって，港湾など海上または沿岸部に建設されるコンクリート構造物を適切に維持管理するためには，鉄筋の腐食の有無を精度よく点検できる方法を確立させる必要がある。現在，鉄筋腐食の非破壊診断手法として，自然電位法や分極抵抗法などがある。これらは，鉄筋腐食が電子やイオンなどの電荷の移動を伴う電気化学的な現象であることを利用した手法である。

自然電位法は，非常に簡便な方法で腐食判定が行える手法である。**表-1** に ASTM C 876 の腐食判定基準を示す[1)]。自然電位による腐食判定では電位が卑化するほど腐食の可能性が高いことになる。ただし，実構造物調査において腐食判定結果と実際の腐食の状態は必ずしも一致しないという報告もある[2)]。

分極抵抗法は，鉄筋の腐食速度を評価するもので，進展期までの腐食進行予測に活用できる可能性のある手法である。判定基準の一例を**表-2** に示す[3)]。ただし，一時的な腐食速度の測定となるため，将来予測を行う際に鉄筋の腐食速度が変化する場合などについて課題があると考えられる。

ただし，いずれの測定法も，塩害を受けるコンクリート構造物を適切に維持管理していくためには必要な手法であると考えられる。そこで，本研究では，コンクリート供試体の自然電位および分極抵抗の測定を定期的に行い，その経時変化を把握するとともに，鉄筋腐食診断の妥当性について検討を行った。なお，港湾コンクリート構造物は，海水に近い位置に曝されることが多く，湿潤な環境となる。また，同一環境においても，使用するセメントの種類によって，鉄筋表面の pH，含水率および溶存酸素濃度などの腐食環境は異なることが予想される。そこで，10 種類のセメントを用いて供試体を作製し，海水の影響を受けやすくコンクリート内部の含水率が高い状況となる干満帯で暴露試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の作製に使用したセメントは，**表-3** に示すように普通・中庸熱・低熱ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末，フライアッシュおよび石灰石微粉末を混和させた混合セメントの計 10 種類を用いた。高炉スラグ微粉末の置換率は 50%，フライアッシュの置換率は 2 成分系が 30%，三成分系が 25%とした。なお，使用したセメントの密度および比表面積は**表-3** に示すとおりである。

表-1　ASTM C 876 による自然電位の腐食判定基準

鉄筋腐食の可能性	自然電位 E (V vs. 海水 Ag/AgCl)
90%以上の確率で腐食なし	-0.135 < E
不確定	-0.285 < E < -0.135
90%以上の確率で腐食あり	E < -0.285

表-2　分極抵抗による腐食判定の一例

	腐食電流密度 I_{corr} (μA/cm^2)	分極抵抗 R_p (kΩ cm^2)
腐食なし	I_{corr}＜0.2	130＜R_p
低～中程度	0.2≦I_{corr}≦0.5	52≦R_p≦130
中～高程度	0.5≦I_{corr}≦1.0	26≦R_p≦52
著しい腐食	1.0＜I_{corr}	R_p＜26

*1　（独）港湾空港技術研究所　地盤・構造部　材料研究チーム　研究官　博（工）　（正会員）
*2　（独）港湾空港技術研究所　地盤・構造部　構造研究チーム　リーダー　博（工）　（正会員）
*3　（独）港湾空港技術研究所　地盤・構造部　材料研究チーム　リーダー　博（工）　（正会員）
*4　三菱マテリアル（株）（正会員）

表-3 セメントの種類

記号	セメントの種類	ﾍﾞｰｽｾﾒﾝﾄと混和材の割合	密度および比表面積
NC	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ		密度 3.16g/cm^3，比表面積 3400cm^2/g
MC	中庸熱ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ		密度 3.22g/cm^3，比表面積 3430cm^2/g
LC	低熱ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ		密度 3.22g/cm^3，比表面積 3500cm^2/g
NBB	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末混合ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 50%	NC と同じ
	(NC ﾍﾞｰｽ)	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末 50%	密度 2.89g/cm^3，比表面積 4170cm^2/g
MBB	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末混合ｾﾒﾝﾄ	中庸熱ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 50%	MC と同じ
	(MC ﾍﾞｰｽ)	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末 50%	密度 2.89g/cm^3，比表面積 4170cm^2/g
LBB	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末混合ｾﾒﾝﾄ	低熱ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 50%	LC と同じ
	(LC ﾍﾞｰｽ)	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末 50%	密度 2.89g/cm^3，比表面積 4170cm^2/g
FC	ﾌﾗｲｱｯｼｭⅡ種混合ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 70%	NC と同じ
	(NC ﾍﾞｰｽ)	ﾌﾗｲｱｯｼｭⅡ種 30%	密度 2.39g/cm^3，比表面積 3930cm^2/g
FCN	ﾌﾗｲｱｯｼｭⅢ種混合ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 70%	NC と同じ
	(NC ﾍﾞｰｽ)	ﾌﾗｲｱｯｼｭⅢ種 30%	密度 2.13g/cm^3
LP	石灰石微粉末混合ｾﾒﾝﾄ	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 70%	NC と同じ
	(NC ﾍﾞｰｽ)	石灰石微粉末 30%	密度 2.70g/cm^3
NBF	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末および	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 25%	NC と同じ
	ﾌﾗｲｱｯｼｭ混合ｾﾒﾝﾄ	高炉ｽﾗｸﾞ微粉末 50%	密度 2.89g/cm^3，比表面積 4170cm^2/g
	(NC ﾍﾞｰｽ)	ﾌﾗｲｱｯｼｭⅡ種 25%	密度 2.39g/cm^3，比表面積 3930cm^2/g

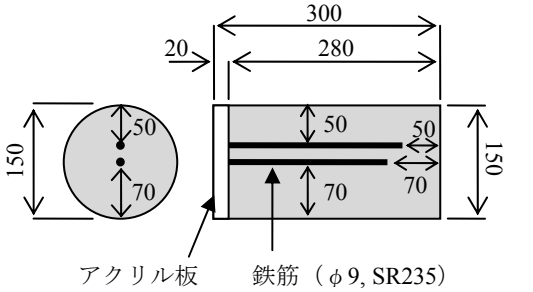
表-4 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの性状

セメントの種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）				AE 減水剤 (ml/m^3)	AE 剤 (ml/m^3)	練上り温度(℃)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G					
NC	50	43	160	320	776	1048	800	14	23.0	7.5	4.3
MC	50	43	155	310	787	1063	775	19	21.9	7.0	4.5
LC	50	43	155	310	787	1063	775	25	23.0	8.0	5.0
NBB	50	43	160	320	770	1040	800	22	23.0	8.5	4.8
MBB	50	43	155	310	781	1055	775	25	22.5	7.5	4.8
LBB	50	43	155	310	781	1055	775	31	23.0	8.5	4.9
FC	50	43	150	300	783	1058	750	54	22.5	9.5	5.0
FCN	50	43	162	324	755	1020	810	107	23.0	6.5	4.4
LP	50	43	158	316	773	1045	790	28	23.0	7.5	4.6
NBF	50	43	150	300	780	1054	750	60	23.0	6.5	4.3

コンクリートの配合を**表-4** に示す。配合は，水結合材比を 50%，細骨材率を 43%に合わせ，目標スランプを 8.0±1.5cm，目標空気量を 4.5±0.5%として，コンクリートのスランプおよび空気量が満足するように単位水量を変化させた。粗骨材には東京都青海市産砕石（最大粗骨材寸法 20mm，表乾密度 2.65g/cm^3，吸水率 0.47%）を，細骨材には静岡県菊川市産陸砂（表乾密度 2.56g/cm^3，吸水率 1.74%，粗粒率 2.88）を用いた。混和剤は，AE 減水剤標準型（Ⅰ種）および AE 剤（Ⅰ種）を用いた。

供試体の形状は，**図-1** に示すようなφ150mm×300mm の円柱とした。供試体には，かぶり 70mm および 50mm として，φ9mm の丸鋼（SR235）を埋設した。また，供試体端部（打設下面側）は鉄筋の防食のためアクリル板を設置し，打設面側は鉄筋端部からかぶりと等しく 50mm または 70mm 確保し打設した。なお，予め鉄筋にリード線を取り付け，電気化学的測定が行える状態にした。

コンクリート打設後，翌日に脱型を行い，温度 20℃，湿度 80%以上の室内において湿布養生を材齢 28 日まで行った。



（単位：mm）

図-1 供試体の形状

2.2 暴露試験方法

暴露試験は，港湾空港技術研究所内の海水循環水槽で行った。海水循環水槽は，神奈川県久里浜湾内の海水を施設内に引き込み，1 日 2 回の干満を模擬した暴露試験施設である。供試体は，**図-2** に示すとおり，海水浸漬が 4 時間/回と乾燥が約 8 時間/回の繰返しが作用する環境に設置した。なお，海水の塩化物イオン濃度は約 16.7g/l である。なお，暴露開始は 1998 年 10 月 21 日で，暴露期間は 10 年とした。

2.3 自然電位および分極抵抗の測定方法

自然電位の測定は，照合電極に海水銀塩化銀電極を用い，高抵抗電圧計により行った。自然電位の測定は暴露開始から約 3 年間連続的に行い，その後は，暴露 5 年および 10 年経過後に測定した。

分極抵抗の測定は，照合電極に海水銀塩化銀電極を用い，交流インピーダンス法によって行った。対極にステンレス板を用い，供試体中の鉄筋の全表面を測定の対象とした。なお，測定周波数は，10Hz および 20mHz の 2 種類とし，電圧 10mV を印加した。なお，求めた分極抵抗値から式(1)を用いて，腐食電流密度を推定した。

$$I_{corr} = K \cdot \left(\frac{1}{R_p} \right) \tag{1}$$

ここで，I_{corr} は腐食電流密度（A/cm^2），R_p は分極抵抗（Ωcm^2），K は定数（V）である。なお，定数 K には 0.026V を用いた。分極抵抗は，暴露約 2 年経過後から約 3 年経過後までの 1 年間において，2 週間に 1 回程度の頻度で測定した。その後，暴露 5 年および 10 年目に試験体を暴露水槽から取り出し測定した。5 年目の測定は 2003 年 8 月 26 日に，10 年目の測定は 2008 年 9 月 9 日に行った。

2.4 鉄筋の腐食調査

実際の腐食量を測定するために，所定の暴露期間（5 年および 10 年）経過後において，鉄筋をはつり出し腐食調査を行った。腐食調査では腐食面積率および腐食減量の測定を行った。腐食面積率は，はつり出し後の鉄筋の腐食部分を目視でトレースして行った。腐食減量の測定は，表面に付着したモルタルを除去した後、10%のクエン酸二アンモニウム溶液にインヒビターとして2-メルカプトベンゾチアゾールを 150ppm 添加し，液温を約 35℃とした溶液中に約 24 時間浸漬させて，腐食生成物等を除去した後に鉄筋質量を測定することで行った。

3. 結果および考察

3.1 鉄筋腐食

暴露 5 年および 10 年時に供試体中鉄筋の腐食調査を行った。**図-3** に鉄筋の腐食減量の測定結果を示す。いずれの供試体も暴露 10 年時には腐食が確認された。ただし，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和したコンクリート中の腐食は，ポルトランドセメント系の供試体に比べ非常に軽微なものであった。一方，ポルトランドセメント系のコンクリートの腐食は 20～35mg/cm^2 と著しく，孔食も確認できた。ただし，腐食によるコンクリートのひび割れは観察されなかった。

3.2 自然電位

鉄筋の自然電位の経時変化を**図-4** に示す。なお，**表-1** に示した判定基準も併せて示す。コンクリートの種類に

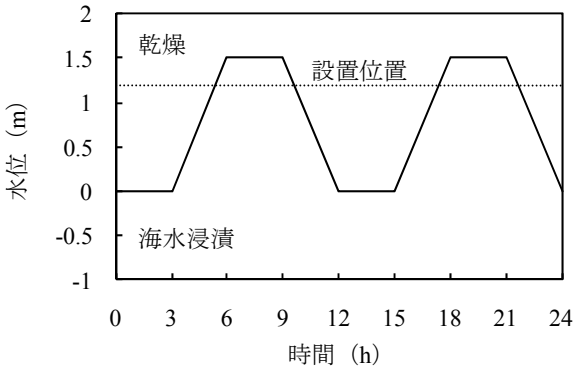


図-2　海水循環水槽の 1 日の乾湿サイクル

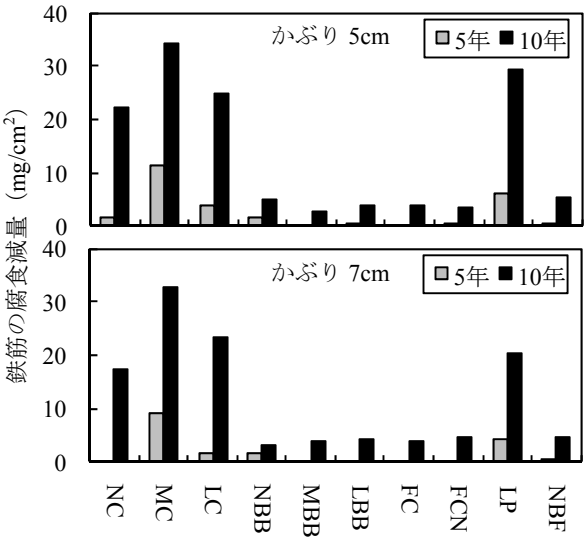


図-3　鉄筋の腐食減量

関係なく，電位挙動は暴露半年経過後あたりから全体的に卑化する傾向を示した。その後，自然電位は夏期に卑化し、冬期に貴化する傾向が認められた。また，暴露開始後 1.2～2.2 年の自然電位の挙動をみると，1 年間のばらつきは，**図-5** より，若干の差はあるが，コンクリートの種類に係わらず-200～-600 (mV vs. 海水 Ag/AgCl，以下同じ) 程度の範囲で変化するものと考えられる。また，年間の平均値は-450mV 程度となった。これは，全ての供試体において，**表-1** の基準によると「90%以上の確率で腐食あり」と判定される範囲である。しかしながら，**図-3** に示す暴露 5 年時の腐食減量の結果から，全ての供試体において暴露 2 年時に腐食が発生している可能性は非常に低いと考えられる。この自然電位の卑化の原因としては，コンクリート中の溶存酸素の影響が大きいと考えられる。一般に海中のように溶存酸素量が少ない場所では，自然電位は卑となる傾向を示す。干満帯においても，比較的湿潤な環境となるため，自然電位が卑化したものと推察される。季節的な電位の変動に関しては，温度上昇に伴う溶存酸素濃度の減少やコンクリート抵抗値の減少などが影響したものと予想される。

いずれにしても，直接海水の影響を受け，湿潤な環境

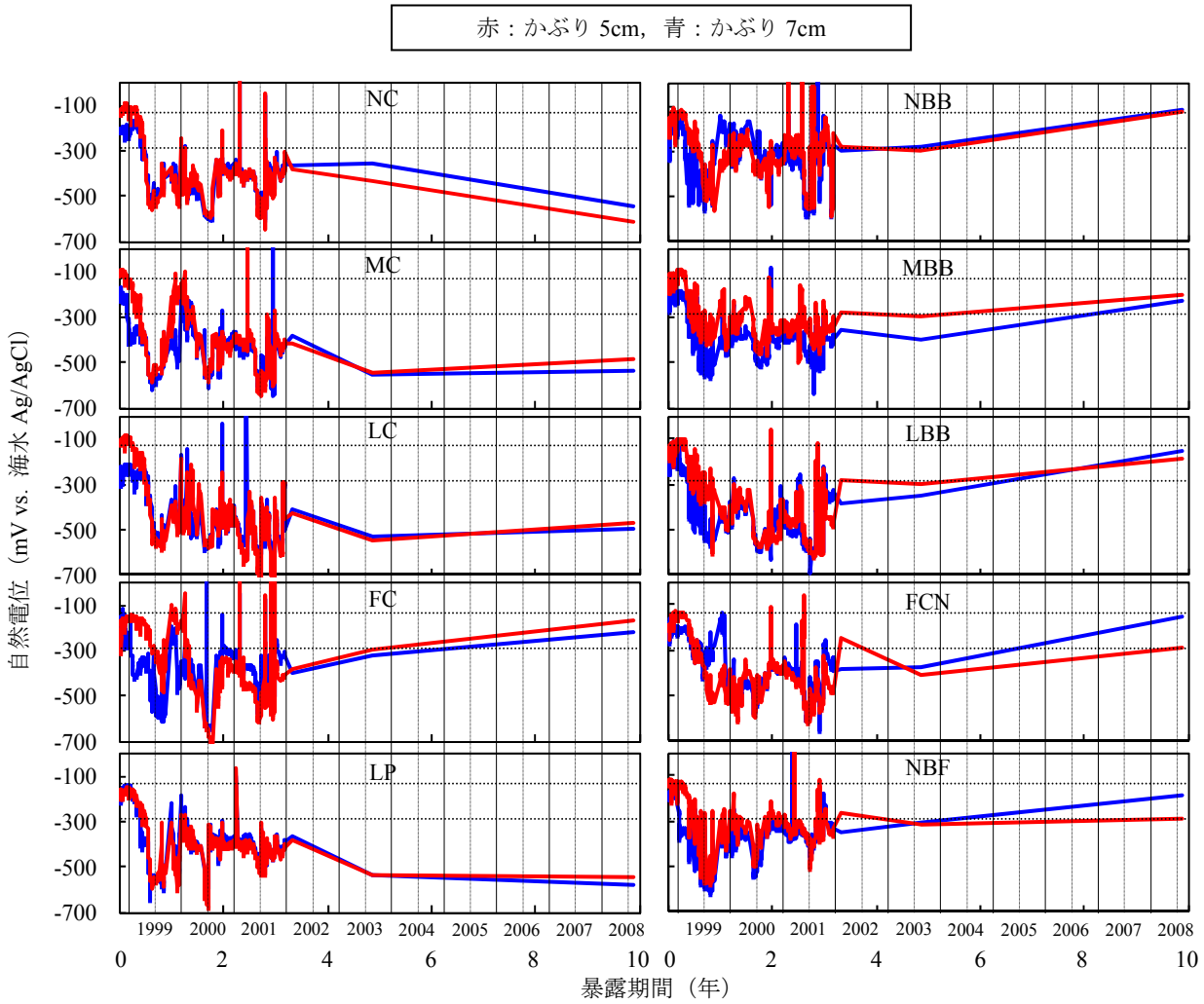


図-4　自然電位の経時変化

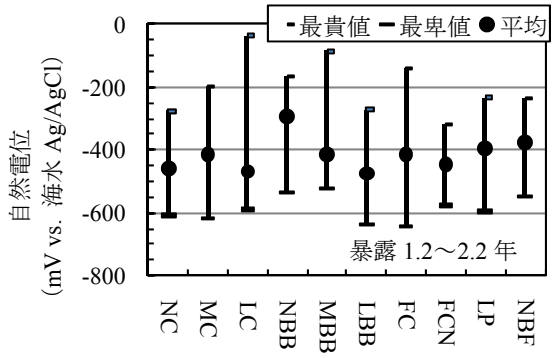


図-5　自然電位の 1 年間の平均値とそのばらつき

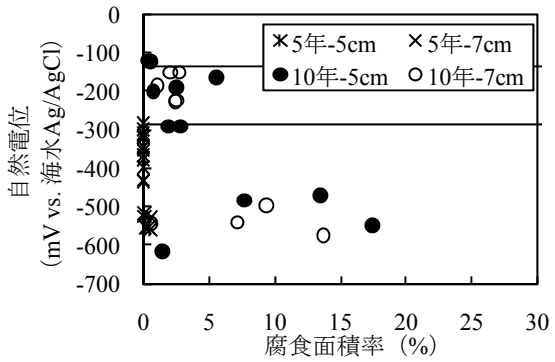


図-6　解体時の自然電位と腐食面積率との関係

となるコンクリート構造物の電位は卑化するため，電位測定による鉄筋腐食診断を行う際は注意が必要である。

図-6 に供試体解体時の自然電位と腐食面積率の関係を，**図-7** に供試体解体時の自然電位と鉄筋の腐食減量の関係を示す。暴露 5 年時の自然電位は全体的に卑な値を示し，-500mV より卑な場合に大きな腐食が認められている。一方、暴露 10 年時の結果では、自然電位が-450mV より卑な場合に大きな腐食が認められ，それより貴な場合は若干の腐食が認められる程度であった。このことから、今回のような比較的湿潤な環境においても，自然電

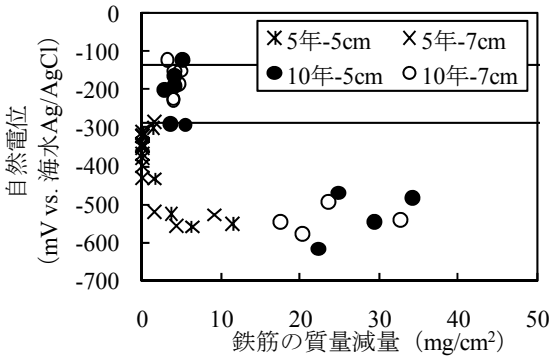


図-7　解体時の自然電位と質量減量との関係

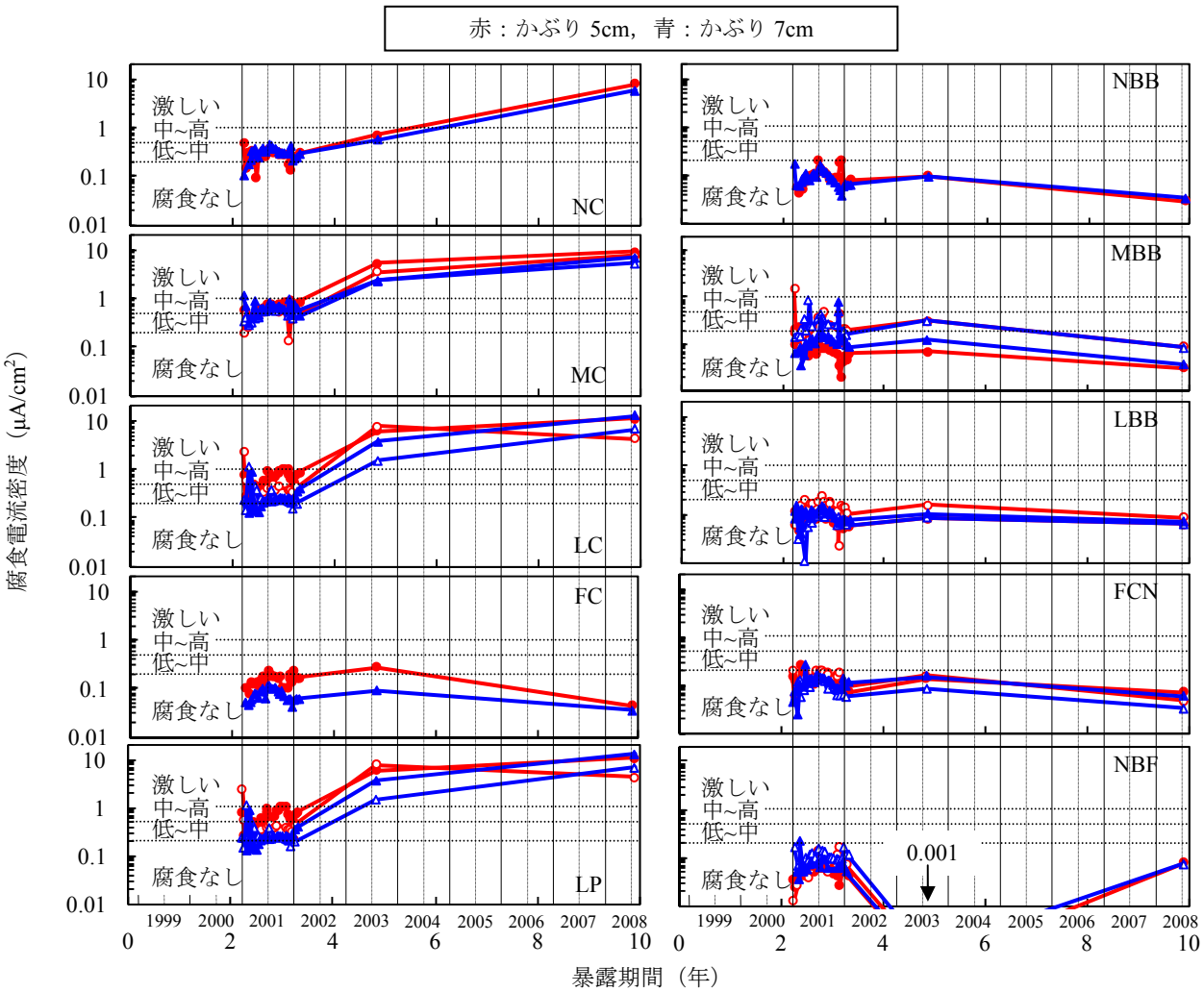


図-8　腐食電流密度の経時変化

位による鉄筋腐食の判定は可能であると思われるが，判定の閾値は常に一律ではなく，環境やコンクリートの条件に依存すると推察される。なお，今回の結果の腐食の閾値は-450mV 程度と考えられ，ASTM の判定基準に比べ明らかに卑値となる。また，環境条件により大きく変動することが予測されるため，腐食の有無は構造物全体における相対的な電位差も考慮する必要があると思われる。これらに関しては，今後の課題である。

3.3 分極抵抗

図-8 に各供試体の分極抵抗値から求めた腐食電流密度の経時変化について示す。腐食減量の大きかったポルトランドセメント系および LP の腐食電流密度は，時間の経過とともに増加する傾向を示した。一方，高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた混合セメント系の腐食電流密度は，ほぼ一定の値を示した。**表-2** に示す判定では，ほとんどの場合において「不動態状態（腐食なし）」の範囲を推移しており、ポルトランドセメント系に比べ鉄筋の腐食に対する抵抗性が高いことが分かる。

図-9 に供試体解体時の腐食電流密度と腐食面積率の関係を，**図-10** に供試体解体時の腐食電流密度と腐食減

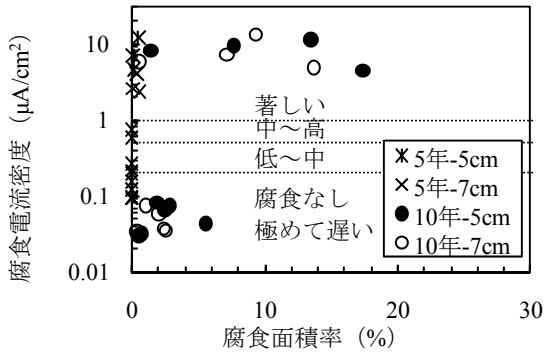


図-9　解体時の腐食電流密度と腐食面積率との関係

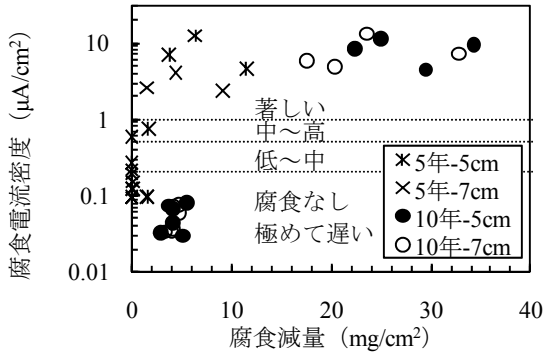


図-10　解体時の腐食電流密度と質量減量との関係

量の関係を示す。いずれの場合も，測定された腐食電流密度が大きくなるにしたがって，腐食量も大きくなる傾向を示し，分極抵抗法によって鉄筋の状態を判定できていると考えられる。しかしながら，腐食電流密度が 0.2μA/cm^2 を下回った場合においても若干の腐食が確認されたことや，同じ腐食電流密度でも腐食量が大きく異なる場合があった。このことから，1 回の分極抵抗法の測定で腐食診断を行う場合には，一時的な腐食電流密度を評価することになるため，腐食の有無は判定できても，全体の腐食量を評価することは難しいと考えられる。

分極抵抗値から腐食減量を推定するために，経時的な腐食電流密度の変化をもとに腐食速度を算出し，時間積分することで腐食減量を推定した。なお，腐食電流は全て鉄の腐食反応によると仮定し，ファラディの第 2 法則から腐食速度を求めた [4]。推定結果と実測値との関係を図-11 に示す。推定した腐食減量と実測値との関係は，ある程度の相関が得られていると考えられるが，推定腐食量は実測した腐食量よりも非常に大きくなる傾向にあった。これは，今後の課題であるが，15 年間海中に暴露させた場合に対して同じ方法で腐食速度を測定した結果 [5] においても，腐食速度が 1μA/cm^2 を超えているにも係わらず，腐食は軽微あるいはほとんど生じていない場合があったことなどから，鉄筋周囲に供給される酸素量が少ない環境では，分極抵抗から計算される腐食速度は，実際の状況よりも大きな値を示すものと推測される。

ただし，誤差や多少のばらつきはあるが，ある程度の相関が得られていることから，厳しい環境下に曝される構造物などに対して，継続的に腐食電流密度を測定することは，ひび割れ発生までの鉄筋腐食の診断が行える有効なモニタリング手法であると考えられる。

4. まとめ

本研究は，海水の影響を受け，かつ，湿潤な環境にある，様々なセメントを使用したコンクリート中鉄筋の腐食と電気化学的腐食診断手法である自然電位や分極抵抗との関係について整理し，腐食診断結果の妥当性について検討した。以下に結果を示す。

1）セメントの種類に係わらずコンクリート中鉄筋の自然電位および分極抵抗は，ほぼ同様な挙動を示す。

2）鉄筋が腐食していない場合の自然電位は，湿潤環境にあるコンクリート構造物では卑化する傾向を示す。干満帯の場合，年平均で-450(mV vs. 海水 Ag/AgCl) 程度で，-200～-600 (mV) 程度の範囲で変化するものと考えられる。自然電位による鉄筋腐食判定は可能であると思われるが，判定の閾値は常に一律ではなく，環境やコンクリートの条件に依存すると推察される。ただし，長期暴露後の電位のばらつきは評価できていない。これは今後の課題とする。

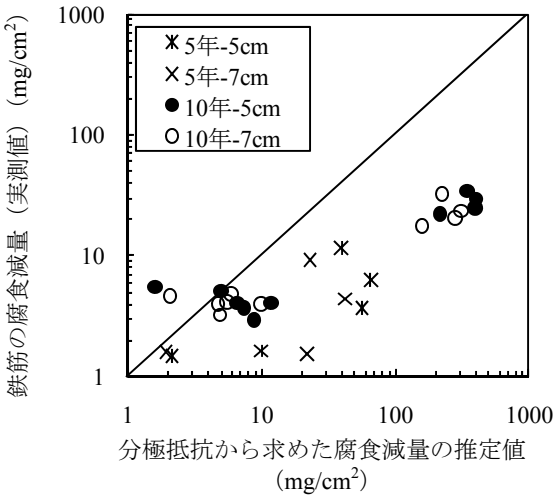


図-11　腐食減量の推定値と実測値

3）分極抵抗法による診断は，干満帯暴露のように鉄筋周囲に供給される酸素量が少ない環境では，分極抵抗から計算される腐食電流密度が実際の状況よりも大きな値を示す可能性がある。ただし，誤差や多少のばらつきはあるが，ある程度の相関が得られていることから，継続的に腐食電流密度を測定することは，ひび割れ発生までの鉄筋腐食の診断が行える有効な手法であると考えられる。

謝辞

本研究は，（社）セメント協会と（独）港湾空港技術研究所との共同研究で得られた成果の一部である。ここに付記するとともに，関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) ASTM C 876-91：Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999

2) 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集，Vol.20，No.1，pp.185-190，1998

3) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリートの診断技術'08，基礎編，pp.166-167，2008.3

4) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338 委員会）委員会報告，コンクリート技術シリーズ No.86，pp.176-199，2009.10

5) 山路徹，Tarek Uddin Mohammed，青山敏幸，濵田秀則：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメント種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.577-582，2001