

論文 中性化および乾湿繰返しを受けるコンクリート中の鉄筋腐食について

仁平 達也*1・井原 啓知*2・関 博*3

要旨： 従来、鉄筋コンクリート構造物は耐久性に優れていると言われてきたが、近年塩害、アルカリ骨材反応、中性化などの単独要因および複数要因による劣化が報告されている。本研究では、実構造物すべてに起こりうる中性化に着目した。実環境により近づけるために、中性化と乾湿繰返しを同時進行させ、埋設鉄筋の経時変化を調べた。埋設鉄筋は丸鋼と板鋼の2種類とし、板鋼についてはかぶりを変化させた。丸鋼と板鋼の実験値を比較し、また中性化残りと自然電位の関係を検討した結果、中性化の進行に伴う自然電位と中性化残りの関係式を導くことが出来た。

キーワード： 中性化、乾湿繰返し、比抵抗、自然電位、鉄筋腐食

1. はじめに

RC部材ではコンクリートの炭酸化(本文では、‘炭酸化’を‘中性化’と表現する)の進行により鉄筋が腐食するおそれがある。既往の研究¹⁾では所定の深さまで中性化を進行させ、その後湿度を変化させることで腐食促進試験を行った例が多いが、本研究では中性化促進試験と腐食促進試験を同時に行う。具体的には高濃度二酸化炭素環境下に供試体を供し中性化を促進させると同時に、一定期間ごとに高湿度・低湿度サイクルの環境下に供し、細孔中の含水状態を変化させる試験を行い、コンクリートの物性(中性化深さ、比抵抗)、埋設鉄筋(自然電位、腐食速度、腐食面積率、腐食量)への影響を観察する。埋設鉄筋には、一般的な丸鋼と、促進面方向以外をコーティングしたかぶりの異なる板鋼を用いる。実験より得られたデータから、「中性化残り」と「自然電位」との関係性を考察する。

2. 実験方法

2.2 使用材料および配合

使用材料を表-1に、コンクリートの示方配合を表-1に示す。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	川砂 (密度 2.62 g/cm^3 , F.M.2.95)
粗骨材	碎石 (密度 2.66 g/cm^3 , F.M.6.52, 最大寸法10mm)
AE減水剤	ボゾリスNO.70
鉄筋	丸鋼 SR235
	板鋼 SS400

2.1 供試体の形状・設置条件

3種類の供試体を用意しそれぞれ中性化深さ測定供試体、比抵抗測定供試体、鉄筋腐食測定供試体とした。形状は $50 \times 50 \times 200 \text{ mm}$ の角柱供試体である。供試体を中性化促進装置(ルネイアー中性化促進試験装置、朝日化学株式会社製)に静置し、二酸化炭素濃度10%の環境とし、40%湿度95%条件の湿潤環境で7日間、40%湿度60%条件の乾燥環境で7日間を1サイクルとする条件とした。これを本文では「中性化・腐食促進試験」と称する。さらに対照実験のた

表-2 示方配合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材(ml) AE減水剤
70	48.8	8.0	8.0	173	246	854	911	616

*1 財団法人 鉄道総合技術研究所 工修 (正会員)

*2 早稲田大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

*3 早稲田大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

めに、大気中二酸化炭素濃度と同一濃度で前述と同一の温度・湿度条件で同一サイクルでの腐食促進試験を恒温・恒湿試験装置(低温恒温恒湿器、いすゞ製作所製)内に静置した。これを本文では「腐食促進試験」と称する。鉄筋腐食測定供試体について埋設する鉄筋はアセトンで表面の油分を十分に除去し、さらに、10%クエン酸2アンモニウム溶液に72時間浸漬し黒皮を完全に除去したものを使用した。丸鋼を埋設した供試体はかぶり15.0mmであり、板鋼を埋設した供試体はかぶりが16.5mm、19.5mm、22.5mmの3種類である。特に、板鋼は図-1に示すように腐食促進面以外の5面はシリコン樹脂でコーティングした。供試体の実験条件を表-3に示す。供試体は打設後24時間で脱型し6日間水中養生をした後、促進面を除いた5面をエポキシ樹脂でコーティングし3週間気中養生する。その後所定の実験材齢まで試験環境下に24週間設置する。実験データは各測定期間についてそれぞれ3供試体の平均とし、自然電位の測定は全供試体の平均とした。

2.3 中性化深さの測定

中性化深さの測定は試験開始から4週ごとに、ダイヤモンドカッターを用いて断面方向に対して平行に切断し、割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を吹きつけ未着色部分を中性化域とした。割裂面にOHP用紙をかぶせて未着色部分を写し取り、ドットカウントプログラム(株式会社ピーエス三菱製)を用いて断面面積に占める未着色部面積の割合から中性化深さを求めた。

2.4 比抵抗の測定

比抵抗の測定は、ステンレス板を50mm間隔でコンクリート中に24mm(かぶり+丸鋼の鉄筋径の長さ)の深さに埋設した。測定は中性化・腐食促進試験、腐食促進試験ともに湿度環境を切り替える直前に行った。ACインピーダンス法を用い、最大付加電圧10mV、周波数は1kHzとして、比抵抗は以下の式(1)で算出した。

$$r = \frac{Z \times A}{H} \quad (\text{k}\Omega \cdot \text{mm}) \quad (1)$$

ここで、

Z: インピーダンスの実数成分 (k Ω)

A: 供試体の断面積 (mm²)

H: 供試体の高さ (mm)

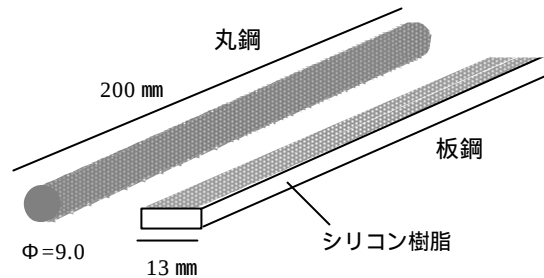


図-1 使用鉄筋

表-3 鉄筋腐食供試体の実験条件

シリーズ	鉄筋の種類	かぶり (mm)	促進条件
A	丸鋼	15.0	中性化+腐食
B1	板鋼	16.5	中性化+腐食
B2	板鋼	19.5	中性化+腐食
B3	板鋼	22.5	中性化+腐食
C	丸鋼	15.0	腐食
D	板鋼	19.5	腐食

*B-Dシリーズは5面をシリコン樹脂でコーティング

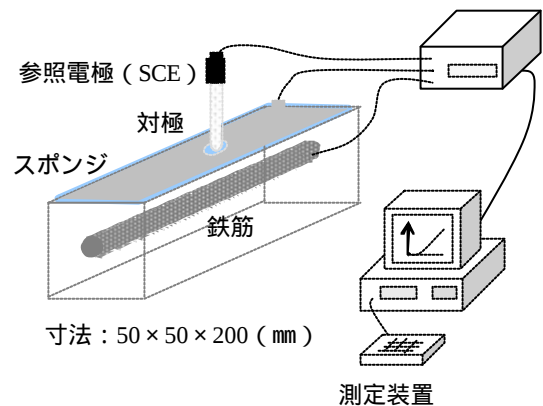


図-2 自然電位および分極試験

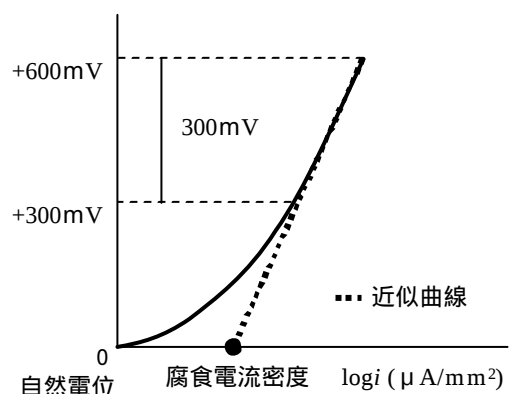


図-3 腐食電流密度の算定

2.5 自然電位および腐食電流密度の測定

供試体設置より 0、4、8、12、16、24 週において自然電位、腐食電流密度の測定を行った。図 - 2 に実験概要図を示す。参照電極には飽和カロメル電極(SCE) (東亜電波工業株式会社製)、対極にはステンレス板、コンクリートと対極の間には湿ったスポンジを設置した。測定前に 24 時間供試体を浸漬し、コンクリートの電氣的抵抗を出来るだけ小さくした。

測定方法は、全自動分極装置 (HZ - 1 A 北斗電工株式会社製) を用いた。自然電位を測定した後、電位の走査速度を +10mV/min とし自然電位から分極幅を +600mV としてアノード分極させ、分極終了後得られた分極曲線に対して Tafel 近似を行って近似曲線を求めた。図 - 3 に示すように、近似する領域は分極幅 +300mV から +600mV の領域とする。

2.6 腐食面積率および腐食量の測定

鉄筋腐食の程度として腐食面積率および腐食重量減少率を測定した。電気化学的測定後の供試体を割裂して鉄筋を取り出し、腐食部分を OHP 用紙に写し取り、ドットカウントプログラムを用いて腐食面積率を測定した。その後、鉄筋をクエン酸 2 アンモニウムの 10% 水溶液に 48 時間浸漬し、錆を取り除いた重量を測定した。腐食促進試験における鉄筋の重量減少量を生成された不動態皮膜の重量とし、腐食量は以下の式(2.2)で求めた。

$$W_{cor} = W_0 - W_1 - \Delta W \quad (\text{mg}) \quad (2)$$

ここで

W_{cor} : 鉄筋腐食量 (mg)

W_0 : 試験前の重量 (mg)

W_1 : 試験終了後の重量 (mg)

ΔW : 不動態皮膜の重量 (mg)

3 . 実験結果・考察

3.1 中性化深さの経時変化

中性化・腐食促進試験における中性化深さの

経時変化を図 - 4 に示す。中性化深さ算定式として一般的であるルート t 則²⁾が初期段階において成立していたが、中性化が進行するにつれて、中性化深さは予測値よりも小さな値となった。式(3)にルート t 則による予測式を示す。式(3)の係数は促進期間 4 週目を基準として求めた。

$$d = 5.05 \times \sqrt{t} \quad (3)$$

ここで、

d : 中性化深さ(mm)

t : 促進期間(週)

中性化は湿潤状態よりも乾燥状態で主に起こるが²⁾、乾湿繰返し環境下では、湿度が変化する際に、インクボトル効果によって水分が内部に閉じ込められて逸散することが出来なくなる細孔が存在し、二酸化炭素の透過が阻害されてしまう。中性化の進行に伴って、反応箇所は徐々に促進面から深い位置で起こり、セメント物質と反応する二酸化炭素の移動経路が長くなるために、経時変化に伴いインクボトル効果の影響が大きくなり、初期段階の結果から算出した値よりも小さい測定値となったと推定される。

3.2 比抵抗の経時変化

比抵抗の経時変化を図 - 5 に示す。コンクリートが中性化すると、細孔組織が密になるため比抵抗の値は大きくなるといわれている³⁾。本研究でも中性化・腐食促進試験の値は腐食促進試

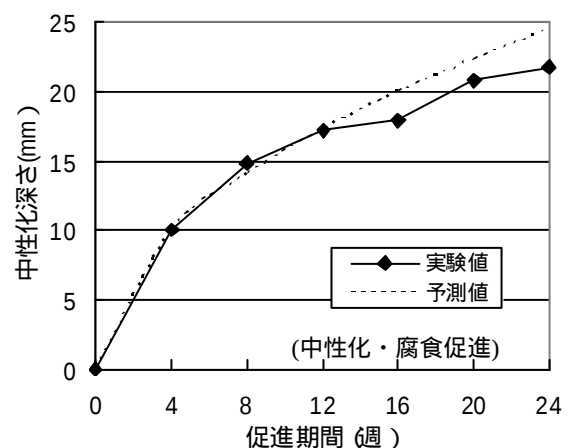


図 - 4 中性化深さの経時変化

験の値の3倍～5倍の値を示した。しかし、5週目以前では両者に大きな相違は見られなかった。その理由として初期段階においては、埋設したステンレス板の深さに比べて中性化深さが小さかったためだと考えられる。また、セメントの水和に伴い腐食促進試験の測定値が漸増していることから、中性化・腐食促進試験での測定値の上昇は中性化と水和反応の両方の作用による細孔組織の緻密化が影響していると考えられる。

3.3 自然電位および腐食電流密度の経時変化

自然電位の経時変化を図-6に、腐食電流密度の経時変化を図-7に示す。自然電位は腐食環境下に供したCおよびDシリーズは-150mV前後で安定した値となったが、中性化・腐食促進環境下に供したA・Bシリーズでは自然電位の値は中性化が進行するにつれ、かぶりが小さいほど卑な値となった。また、A・B1シリーズでは16週目と24週目において、測定値の変化は殆どなかった。腐食電流密度は8週目～12週目から検出され、かぶりの小さいシリーズでは16週目が最大となり、24週目は値が急激に下がった。この16週目～24週目の挙動は4で後述するように、腐食によって生成される錆の影響によるものと考えられる。

丸鋼と板鋼の比較では、丸鋼(Aシリーズ)の値と促進面に一番近いB1シリーズの板鋼の値が自然電位、腐食電流密度ともに似た挙動を示した。このことは、埋設されている丸鋼で測定された自然電位・腐食電流密度はかぶり方向に近い部分の鉄筋状態を表現している可能性が高いことを示唆している。

3.4 鉄筋腐食の経時変化

中性化・腐食促進試験における中性化進行に対する埋設鉄筋の経時変化を以下に示す。

腐食面積率の経時変化を図-8に示す。中性化の進行により、すべての供試体は腐食面積率、単位腐食量ともに増加した。しかし、16週目～24週目においてBシリーズの腐食面積率の増

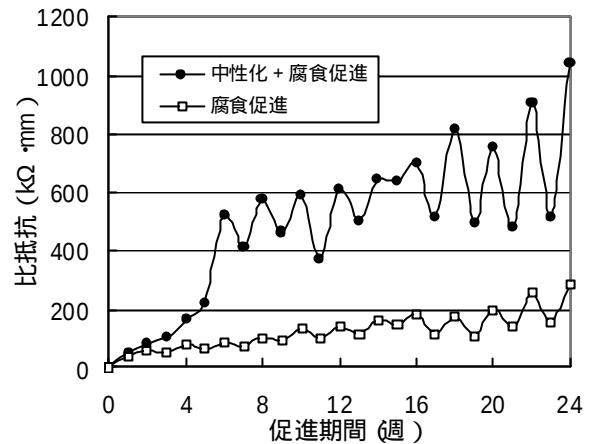


図-5 比抵抗値の経時変化

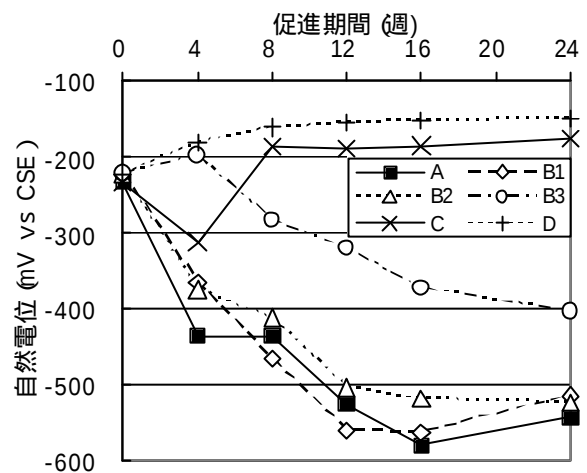


図-6 自然電位の経時変化

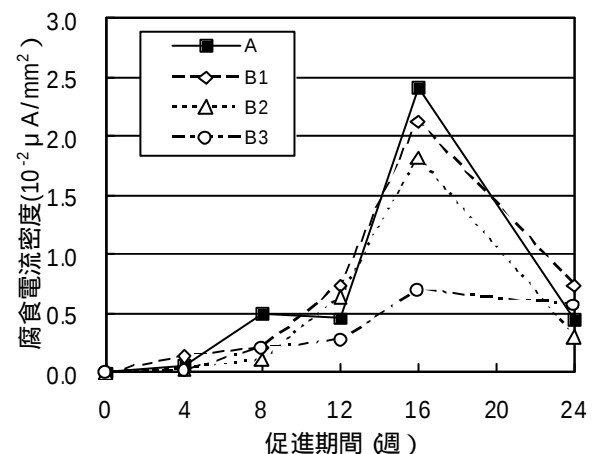


図-7 腐食電流密度の経時変化

加率は異なる傾向が見られた。これは、Bシリーズの鉄筋は促進面と平行に配置されているため、中性化によりB1・B2シリーズ鉄筋が腐食環境下に置かれる面積が急激に発生するのに対し、

B3シリーズは腐食環境下に十分に進行していないために腐食面積が徐々に増加したと推定される。

単位腐食量(腐食量を全表面積で除した値)を図-9に、単位腐食面積腐食量(腐食量を腐食面積で除したもの、点錆除く)の経時変化を図-10に示す。B1・B2シリーズは16週目~24週目での単位腐食量が鈍化し単位腐食面積腐食量が減少している。このことから表面に錆が生成された箇所でのさらなる腐食挙動は、新たに腐食する箇所よりも腐食速度が小さくなると推定される。一方Aシリーズの挙動はかぶり方向に深さをもつために腐食環境下におかれる面積が徐々に増加するので、単位腐食量は単調に増加し、単位腐食面積腐食量もあまり減少しなかったと考えられる。

4. 中性化残りとの自然電位の関係式

BおよびDシリーズで得られた自然電位のデータと中性化残り(かぶりと中性化深さの差)との関係を図-12に示す。本図によると、

- (1) 中性化残りが十分にある場合、自然電位は-150~-200mVの貴の状態にある。
- (2) 中性化残りが5mm~10mmで自然電位が大きく卑に変化する。
- (3) 中性化残りが0mm付近以降では自然電位は-500~-600mVの卑な状態にある。

上記は次の原因によると推定される。すなわち鉄と酸素の反応状態を示す自然電位において、(1)では中性化の影響を受けない健全なコンクリート中に埋設されている鉄筋の電位は不動態皮膜の形成により電位は貴であり変化がないが、次に(2)では中性化進行によるセメント物質と溶解した二酸化炭素の反応による細孔中のpHの低下により、不動態皮膜が破壊され、鉄の溶出を引き起こし電位は変化し卑になる。さらに(3)では溶出した鉄イオンは溶存酸素と結合し酸化鉄となり、鉄筋表面に付着し錆層を形成し緻密化するので鉄イオンの溶出を阻害する。また一部の酸化鉄はコンクリート中の細孔空隙と毛細

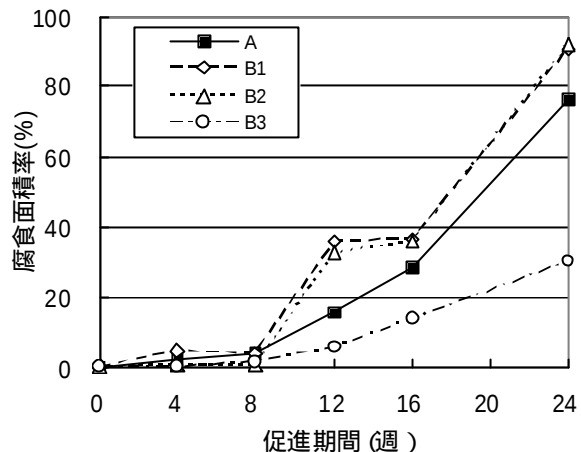


図-8 腐食面積率の経時変化

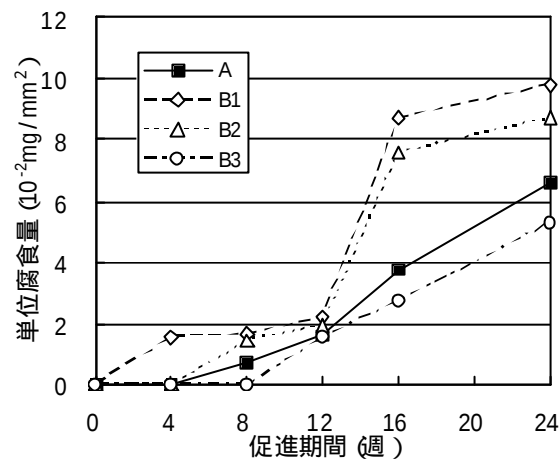


図-9 単位腐食量の経時変化

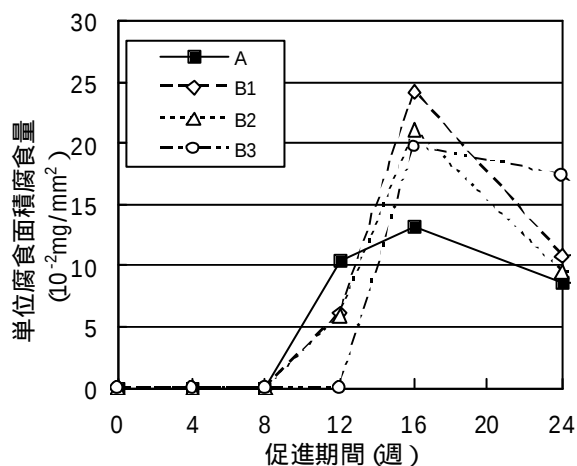


図-10 単位腐食面積腐食量の経時変化

管空隙の表面に付着し外部の酸素の流入を阻害する。これらの要因により鉄の溶解速度抑えられ、電位は卑な値で変化が小さくなると考えら

れる。

これは、腐食がある程度進むと腐食電流密度が急激に低下し(3.3)、単位腐食量の増加が鈍化する(3.4)という実験結果からも推定される。

中性化残りとの自然電位の関係は、(1)自然電位が貴で安定している。(2)中性化の進行に対して自然電位が卑になっていく。(3)中性化が十分進行すると自然電位は卑となり電位の変化が小さくなる。という実験結果を基に式(4)で表現できる。

$$V(X) = k_1 \times \arctan(k_2(X - k_3)) + k_4 \quad (4)$$

ここで

X: 中性化残り (mm) V(X): 自然電位 (mV)

k_1, k_2, k_3, k_4 : 係数

ただし、係数 $k_1 \sim k_4$ はコンクリートの細孔状態を決定する W/C、空気量、かぶりなどの影響によるパラメータであるとする。

式(4)を利用し、式(5)で本試験における中性化残りとの自然電位の関係を表す。

$$V = 140 \times \arctan((X - 5.0) / 3) - 370 \quad (5)$$

ここで

X: 中性化残り (mm) V(X): 自然電位 (mV)

実験値と提案式の比較を図 - 12 に示す。

5. まとめ

本研究では、高濃度二酸化炭素環境下および乾湿繰返し環境下でのコンクリートの物性、埋設鉄筋の経時変化についての試験を行った。本論文の範囲内では以下の事項が明らかになった。

- 1) 乾湿繰返し環境下での、高濃度二酸化炭素による中性化進行速度はルート t 則で推定される値よりも小さい。
- 2) 比抵抗値において、中性化部は未中性化部での比抵抗値よりも 3~5 倍となる。
- 3) 中性化により、内部鉄筋の自然電位は急激に卑となり、腐食が確認されるが、ある程度腐食が進行すると卑な電位での安定、腐食電流密度の急激な減少、単位腐食量の増加の鈍

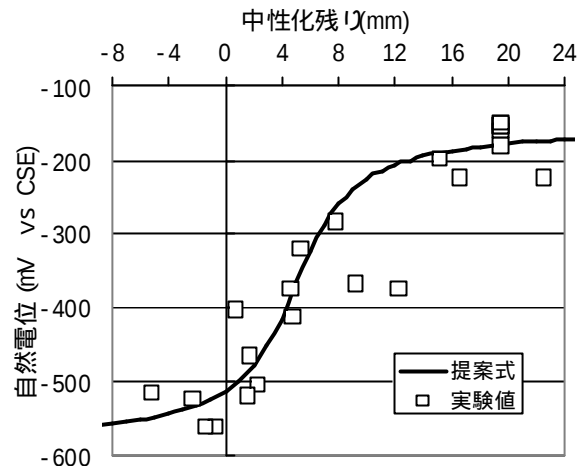


図 - 11 実験式と提案式の比較

化、単位腐食面積腐食量の減少が生じる。

4) 中性化による鉄筋の腐食は、生成された錆により鉄の溶解を阻害され腐食速度が減少している可能性がある。

5) 中性化残り(X)との自然電位(V)の関係として、 $V(X) = \arctan(X)$ の関係が得られる。

謝辞: 本研究を行うにあたって、市田拓也氏(現鳥取県庁)、勝俣敦史氏(現早稲田大学理工学部土木工学科)には多大な御助力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩田亮, Qi Lukuan, 関博: 中性化したコンクリート中における鉄筋腐食機構の電気化学的考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.1, 2000, 6
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会: 炭酸化研究委員会報告書, 1993, 3
- 3) 早稲田大学理工学部関研究室: 中性化によるコンクリートの物性変化と鉄筋腐食に関する研究報告書, 1998, 3