

中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価

佐伯竜彦¹・大即信明²・長滝重義³

¹正会員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科 (〒950-21 新潟県新潟市五十嵐2の町8050番地)

²正会員 工博 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

本研究は中性化によるモルタル中の鉄筋腐食性状, 特に, 腐食速度について検討するため, 鉄筋を埋め込んだモルタル供試体を作製し, 促進中性化試験を行って, 鉄筋の電気化学的性質および腐食量を測定した. それらの結果から, 中性化深さや環境条件が鉄筋の腐食に及ぼす影響を明らかにし, 各種要因の定量的評価を行った. また, 中性化による鉄筋腐食モデルを構築し, 中性化進行予測手法と組み合わせることにより, 中性化の進行に伴う鉄筋の腐食の進行を予測した.

Key Words: carbonation, corrosion of reinforcement, electro-chemical properties, resistivity

1. まえがき

中性化はコンクリート内部のpHが低下する現象であり, これによって内部に埋め込まれた鉄筋に腐食の可能性が生じる. このため, 中性化の進行と鉄筋の腐食の関係に関する研究は古くから行われてきている.

中性化による鉄筋の腐食で主に検討されてきたのは, 中性化深さがどの程度になれば腐食が開始するかという問題である. それらの研究を総合すると, 概ね, 腐食の開始は中性化深さが鉄筋表面から数mmの位置に達した時点とされている^{1), 2)}.

しかし, 鉄筋の腐食が開始しても, 構造物は直ちに供用不能になるわけではなく, ある程度腐食が進行するまでは実用上問題がないと考えられるため, 構造物の適切な耐久性評価のためには腐食の開始時期と同様に腐食速度についての検討が不可欠であると考えられる. しかし, 塩害による鉄筋の腐食については詳細な検討が行われているもの³⁾, 中性化に関しては研究例が少ない.

そこで本研究では, 鉄筋を埋め込んだモルタル供試体を用いて, 促進中性化試験, 散水促進中性化試験および一定の中性化深さを与えた後に恒温恒湿状態に暴露する試験を行った. これらの試験により, 中性化残り, 湿度および温度等が鉄筋腐食に及ぼす影響を定量的に評価することを試みた. なお, 「中性化残り」とはかぶりから中性化深さを差し引いたものであり, 岸谷らが中性化の

進行程度と鉄筋の腐食開始時期との関係を検討する際に用いた指標である¹⁾.

さらに, この結果を踏まえて, 腐食進行のモデル化を行うことにより, 鉄筋の腐食速度を試算し, その妥当性を検討した.

2. 実験概要

本研究では, 内部に鉄筋を埋め込んだモルタル供試体を用いて, 以下の2系統の実験を行った.

①シリーズⅠ: 促進中性化試験および散水促進中性化試験中に経時的に腐食性状を検討し, 中性化残りが腐食に及ぼす影響を明らかにする.

②シリーズⅡ: 促進中性化試験によって一定の中性化深さを与えた後に, 供試体を恒温恒湿槽内に保管し, 経時的に腐食性状を検討し, ある中性化残りの場合に温度と湿度が腐食速度に及ぼす影響を明らかにする.

また, 腐食速度に影響を及ぼす要因の一つとして, モルタルの電気抵抗を取り上げ, セメントの水和度および含水率への依存性を検討した.

(1) 使用材料

本研究で用いたセメントは, 日本セメント社製の普通ポルトランドセメントである. セメントの化学成分を表1に示す.

表-1 セメントの化学成分

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
1.2	22.2	4.9	3.0	64.0	1.3	2.1	0.29	0.48	99.47

表-2 モルタルの配合

W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	flow
55	573.6	315.5	1316.3	209
65	514.2	334.2	1316.7	238

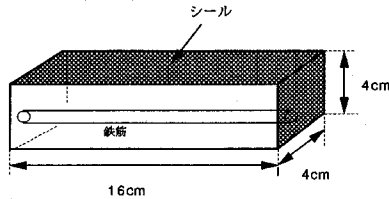


図-1 モルタル供試体

細骨材は、山口県豊浦産の豊浦標準砂、福島県相馬産の相馬砂の細砂および粗砂（特4号および5号）の3種類であり、これらを等重量混合して用いた。

モルタルに埋め込んだ鉄筋は、直径10mmのみがき丸鋼であり、モルタル打設前にアセトンで脱脂した。

(2) 配合

モルタルの配合は、表-2に示す通りである。配合にあたっては、水セメント比が異なっても、ペーストと骨材の体積比が同じとなるようにS/Cを決定した。

(3) 供試体

供試体は4×4×16cmの角柱のものをを用い、鉄筋を図-1のように配置し、かぶりは5mmまたは10mmの2種類とした。

(4) 初期養生条件

モルタル供試体は、打設後24時間の湿空養生を行った後、脱型して所定の材令まで20℃の水中養生を行った。初期養生期間はシリーズIの場合、7日および91日の2種類であり、シリーズIIでは7日のみである。

(5) 促進中性化試験

中性化の促進方法は2種類である。供試体は所定の初期養生終了後、図-1に示すように、4×16cmの1面（型枠底面に接していた面）を除き、他の5面をシールしてから促進試験に供した。

シリーズIにおいては、促進3週、5週および9週目に中性化深さ、鉄筋の自然電位、腐食電流密度、腐食面

表-3 恒温恒湿暴露試験条件

記号	水セメント比 (%)	かぶり (mm)	目標中性化深さ (mm)	保存条件 (温度・相対湿度)
①	55	5	5	40℃-98%
②	55	5	5	40℃-80%
③	55	5	5	40℃-60%
④	55	5	5	20℃-98%
⑤	55	5	5	20℃-80%
⑥	55	5	10	40℃-98%
⑦	55	5	10	40℃-80%
⑧	55	5	10	40℃-60%
⑨	55	10	3	40℃-80%
⑩	55	10	5	40℃-80%
⑪	55	10	10	40℃-80%
⑫	65	5	5	40℃-80%
⑬	65	5	5	20℃-80%
⑭	65	10	10	40℃-80%

積率および腐食重量減少率を測定した。

a) 促進中性化試験

促進中性化試験は、シリーズI、IIともに行った。促進条件は温度40℃、相対湿度50%、二酸化炭素濃度15%である。

b) 散水促進中性化試験

散水促進中性化試験は、促進試験中に供試体にシャワー状の水分を供給するものである⁹⁾。促進条件は、温度40℃、相対湿度50%、二酸化炭素濃度15%であり、1日3時間の散水を行った。散水量は毎分1.5lである。シリーズIについてのみ行った。

(6) 恒温恒湿暴露試験

シリーズIIにおいて行った。促進中性化試験で所定の中性化深さに達した供試体を恒温恒湿槽内に暴露し、試験開始から10週および20週目に鉄筋の自然電位、腐食電流密度、腐食面積率および腐食重量減少率を測定した。実験条件を表-3に示す。

(7) 中性化深さの測定

中性化深さの測定に用いた供試体は、鉄筋を埋め込まず、5面をシールしたものである。所定の材令において、供試体を長軸方向端部から25mmの厚さに割裂して、4×4×2.5cmの試験片を採取し、割裂面にフェノールフタレインの1%エタノール溶液を吹き付け、未着色部分を中性化部分として測定を行った。供試体の残った部分は、割裂面を再びシールし、促進試験を継続した。1回の測定に用いた供試体数は2個である。

(8) 含水率測定

シリーズIIで鉄筋の腐食量測定時に供試体の含水率の測定を併せて行った。用いた供試体は、中性化深さ測定用のものと同様である。供試体表面（シールの無い面）から5mmごとに、深さ20mmまで4点の試料を採取し、炉乾燥（105℃、24時間）前後の重量差によって含水率を求めた。1回の測定に用いた供試体数は2個である。

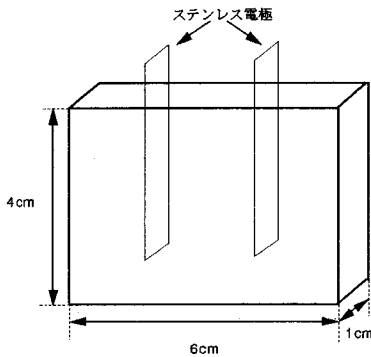


図-2 電気抵抗測定用供試体

(9) 鉄筋の自然電位および腐食電流密度の測定

鉄筋の電気化学的性質として、自然電位および腐食電流密度を測定した。供試体は所定の材齢において、24時間水中浸漬(20℃)し、供試体が飽水状態になった後に、ポテンショスタットを用いて行った。参照電極は飽和カロメル電極であり、対極はステンレス鋼である。

自然電位測定後、自然電位から自然電位+800mV程度までアノード分極を行い、アノード分極曲線を求めた。走査速度は1mV/sとした。このようにして求めたアノード分極曲線から、Tafel近似により算出したものを腐食電流とした⁵⁾。一回の測定に用いた供試体は3個である。

電気化学的な方法で中性化したコンクリート中の鉄筋の腐食速度を求める方法としては、Gonzalezらが行った分極抵抗法が挙げられるが⁶⁾、この方法を用いた場合、腐食電流と分極抵抗の関係は以下の式で与えられ、定数Bの値を定める必要がある。

$$I_{cor} = B / R_p$$

ここで、 I_{cor} ：腐食電流密度

R_p ：分極抵抗

Bの値は活性状態で26mV、不活性状態で52mVと与えられているが、その値は供試体の含水状態で変化するとされている⁶⁾。また、本研究の場合はセメントの水和の程度や中性化の程度によってもこの値が変化することが予想される。このため、供試体の状態に応じてBの値を求める必要がある。しかし、そのためには、腐食重量の測定で信頼性のあるデータを得られるだけの期間、供試体を一定の状態に保つ必要があり、経時的に変化する腐食性状を評価しようとするシリーズIの主旨と合致しない。さらに、このシリーズは中性化残りが腐食速度に及ぼす影響を相対的に評価することを目的としているため、分極時の腐食速度の絶対値は必ずしも必要ではない。以上の理由から、簡便性も考慮して、腐食電流の算

出はTafel近似により行った。

(10) 鉄筋の腐食面積率および腐食重量減少率の測定

本研究では、鉄筋の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。測定は、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用紙に写取り、腐食面積を算出した。その後、鉄筋をクエン酸二アンモニウムの10%水溶液に浸漬し⁵⁾、錆びを取り除いて重量を測定した。腐食重量減少率は以下の式で求めた。

$$r_c = (r_0 - r_1 - r_b) / r_0 \times 100$$

ここで、 r_c ：腐食重量減少率(%)

r_0 ：モルタル打設前の鉄筋重量

r_1 ：クエン酸二アンモニウム水溶液浸漬後の鉄筋重量

r_b ：ブランク

(11) モルタルの電気抵抗測定

モルタルの電気抵抗を測定するため、図-2のような供試体を作製し、真空デシケータ内に暴露した。測定周波数1000Hzの交流抵抗計を用いて経時的に電気抵抗を測定し、供試体中の電極面積(30×5mm)および電極間距離(30mm)により比抵抗を求めた。また、供試体重量を併せて測定し、供試体からの逸散水分量を求めた。薄板状の供試体を用いたのは、供試体内の含水率分布が均一と見なせるためである。

(12) 結合水量の測定

本研究では、セメントの水和の進行程度と電気抵抗の関係について検討するため、水和進行程度の指標として、セメントの結合水量を測定した。

材齢7日、28日および91日まで水中養生した、4×3×0.5cmのモルタル供試体を105℃で24時間乾燥した後、電気炉を用いて1000℃で6時間の加熱を行い、結合水量を測定した。105℃までの重量減少を蒸発可能水量とし、105℃から1000℃までの重量減少を結合水量とした⁷⁾。1回の測定に用いた供試体は3個である。

3. 中性化による鉄筋の腐食性状

(1) モルタルの中性化速度

中性化深さは中性化期間の平方根に比例するとされているため、本研究では、中性化速度を中性化係数(中性化深さの促進期間の平方根に対する比)で評価することとした。実験結果より求めた中性化係数を表-4に示す。表より、水分の供給のある散水促進中性化試験を行

表 4 促進中性化試験および散水促進中性化試験における
中性化係数

水セメント比 (%)	初期養生期間 (日)	促進中性化試験に おける中性化係数 (mm/√週)	散水促進中性化試験 における中性化係数 (mm/√週)
5.5	7	3.16	1.22
	9.1	2.52	0.70
6.5	7	4.18	2.09
	9.1	3.23	1.47

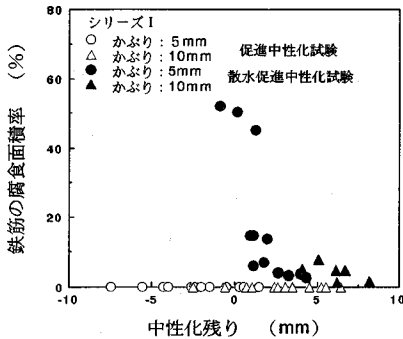


図-3 中性化残り と鉄筋の腐食面積率の関係

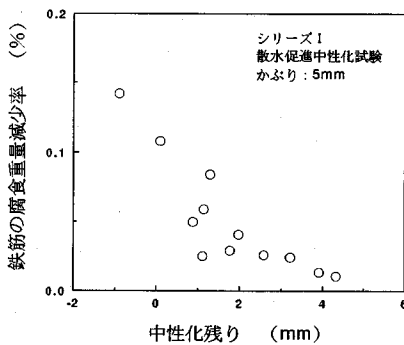


図-4 中性化残り と鉄筋の腐食重量減少率の関係

った場合は、通常の促進中性化試験に比べて中性化の進行が著しく抑制されている⁴⁾。

(2) 鉄筋の腐食開始時期

a) 中性化残り と鉄筋の腐食開始時期の関係

図-3にシリーズIの促進中性化試験および散水促進中性化試験を行った供試体における中性化残り と腐食面積率の関係を示す。図-4に中性化残り と腐食重量減少率の関係を示す。図より、散水促進中性化試験を行った場合は、中性化残りが3mm程度となった時点で腐食が開始しており、その値が小さくなるに従って腐食量が急激に大きくなっている。岸谷らの研究では、腐食の開始は中性化残り10mmの時点としているが、これは、かぶりが20~70mmの供試体における結果である。この値があらゆる条件で成り立つとすれば、本研究で用いた供試体のかぶりは5mmおよび10mmであるため、中性化が進行する前に腐食が開始することになる。従って、かぶり

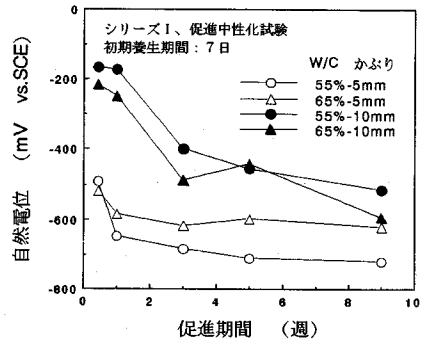


図-5 促進中性化試験における自然電位の経時変化

鉄筋の腐食開始時期の中性化残りの関係については今後検討の必要があると思われるが、本研究では実験的に求めた中性化残りの値を本実験条件の範囲内に限って用いることとする。

また、促進中性化試験を行った場合は試験中に水分の供給を行う散水促進中性化試験を行う場合より中性化の進行が速いにもかかわらず、腐食が見られなかった。促進中性化試験は相対湿度を50%に保っているため、試験開始より供試体から水分の逸散が起きる。腐食反応には水が必要なため、中性化によって不動態被膜が破壊されても腐食が起きなかったものと考えられる⁸⁾。

水が腐食反応に必要とされるのは、溶存酸素や鉄イオンの溶媒として働くためである。また、二次的な影響として電気抵抗が挙げられる。コンクリートの電気抵抗は腐食反応に大きな影響を及ぼす各種イオンの移動に関連し、腐食電流を制限するため腐食速度を考える上で重要であるが、抵抗の値は含水率によって変化することが明らかにされている⁹⁾。Lopezらは、乾燥に伴ってモルタル中の鉄筋の腐食速度が低下することを確かめ、同時に、乾燥の程度と電気抵抗の関係を求めることにより、電気抵抗と腐食電流の間に関係があることを見出している¹⁰⁾。従って、腐食が抑制される主原因は乾燥による電気抵抗の増加と考えられる。

b) 中性化残り と鉄筋の自然電位の関係

図-5にシリーズIの促進中性化試験における鉄筋の自然電位の経時変化を示す。図より、促進期間の増加とともに、即ち、中性化の進行とともに電位が卑になる傾向が見られる。自然電位はその値が卑になるほど腐食の可能性が大きいことを示すことから¹¹⁾、中性化の進行により鉄筋が腐食する傾向に向かっていることが確認できる。しかし、電位がある値に達するとそれ以上は低下していない。かぶりの影響について見ると、かぶりが5mmの場合は促進1週間程度と極めて短期間に電位が一定値となっており、それ以上の低下は見られない。これに対し、かぶりが10mmでは徐々に電位が低下している。図-6は中性化残り と自然電位 の関係を示したもの

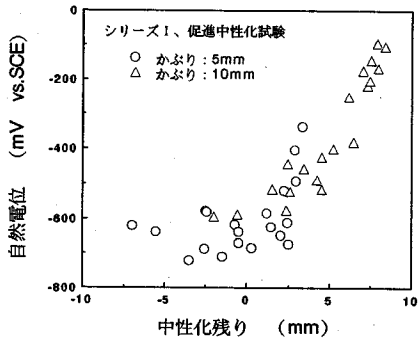


図-6 中性化残りと自然電位の関係 (促進中性化試験)

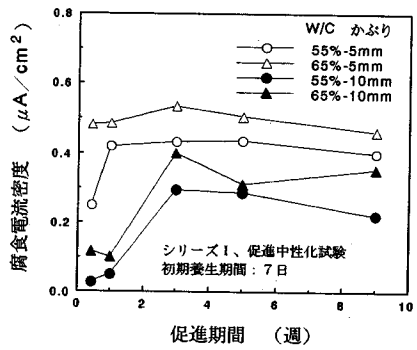


図-8 促進中性化試験における腐食電流密度の経時変化

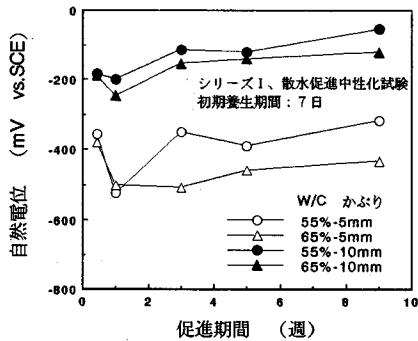


図-7 散水促進中性化試験における自然電位の経時変化

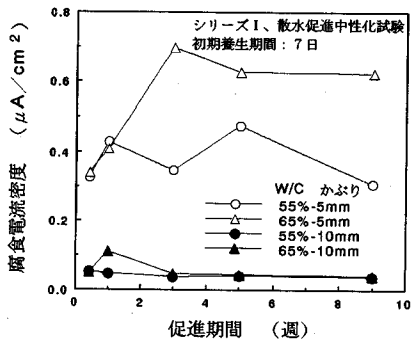


図-9 散水促進中性化試験における腐食電流密度の経時変化

である。図より、中性化残りが小さくなるに従って自然電位が低下しており、中性化残りが2～3mm以下ではほぼ一定値となっている。これは、中性化残りが3mm以下で腐食量が急激に増加すること(図-3参照)と対応していると考えられる。

また、実際には腐食の起こらなかつたにもかかわらず電位が低下しているのは、自然電位が水中で測定されているため、a)で述べた乾燥の影響が排除され、中性化による不動態被膜の変化のみの影響を示しているためと考えられる。

図-7は散水促進中性化試験を行った場合の結果を示したものであるが、促進中性化試験の場合ほど明確な傾向が見られない。これは、中性化深さが小さいことが原因と考えられる。また、腐食が進行しているにもかかわらず、促進1週目までに低下した電位がその後若干の増加を示すものがある。これは、試験中のセメントの水和の影響¹²⁾や中性化部分の水酸化物イオンの欠如による見かけ上の電位の上昇が原因と思われる¹³⁾。

4. 中性化による鉄筋の腐食速度の定量的評価

(1) 中性化残りが腐食速度に及ぼす影響

腐食電流密度は自然電位と異なり、腐食速度と直接結び付く指標である。アノード分極によって得られる値

は、実験概要で示した通り、測定の前処理として供試体を20℃で24時間水中浸漬し、供試体がほぼ飽水状態と見なせる時に得られる値、つまり、一定条件の下での値である。腐食速度は不動態被膜の状態、酸素の供給速度、電気抵抗等の影響を受けるが、前処理として水中浸漬を行っているため、配合が同じ場合は電気抵抗は同じと見なせ、酸素の供給速度は液相では極めて小さいために配合条件等の差は無視できると思われる。このため、実際の腐食速度とは必ずしも相関が得られないと考えられる。しかし、逆に言えば、アノード分極によって得られた値を用いることにより、中性化だけの影響を検討できることになる。

図-8および図-9はシリーズIの促進中性化試験および散水促進中性化試験における、アノード分極によって求めた腐食電流密度の経時変化を示したものである。図より、自然電位と同様に、中性化の進行とともにその値が大きくなり、0.4～0.5 μA/cm²程度になるとそれ以上増加していない。一定値に達するまでの時間を見ると、促進中性化試験では、かぶり5mmの場合は試験開始から1週間程度であるのに対して、10mmの場合は4週間程度となっている。また、散水促進中性化試験では中性化の進行が抑制されるため、かぶり10mmの場合は0.1 μA/cm²程度で一定値をとっている。このように、かぶりが大きい場合には腐食電流密度の増加が遅

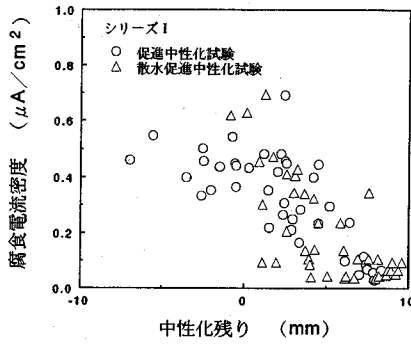


図-10 中性化残りと腐食電流密度の関係

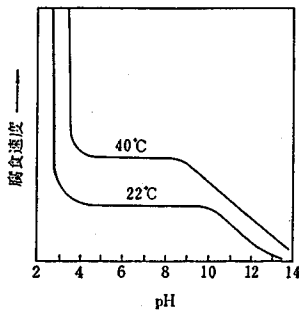


図-11 pHと腐食速度の関係¹⁴⁾

れるか、もしくは、値自体が小さいことから、鉄筋の防食上、かぶりを大きくすることは重要であることが確認できる。

図-10にシリーズIおよびIIにおける中性化残りと腐食電流密度の関係を示す(シリーズIIについては、促進中性化試験終了時の測定値)。図より、腐食電流密度は中性化残り5mm程度で増加し始め、2~3mmで急激に増加しており、腐食量の傾向と一致している(図-3, 4参照)。さらに、中性化残りが2mm以下になると、それ以上腐食電流密度が増加することはなく、若干のばらつきは見られるものの、ほぼ一定値となっている。これは、pHがそれ以上低下しないか、図-11に示されるように¹⁴⁾、pHが低下しても腐食速度が変化しない領域に入ったためと考えられる。腐食電流密度は通常対数目盛のグラフで検討されていることを考えると、中性化による鉄筋腐食においては、ある程度中性化が進行した後は腐食速度が一定になるものと考えられる。以上のことから、中性化残りと腐食電流密度の関係は、中性化残り2mmと5mmを境に、鉄筋周囲の細孔溶液が高アルカリに保たれ、腐食速度が極めて小さい領域(中性化残り:5mm以上)、pHの低下に対応して腐食速度が大きくなる領域(中性化残り:2~5mm)、腐食速度が中性化残りに依存しない領域(中性化残り:2mm以下)の3領域に分けられると考えられる。従って、腐食

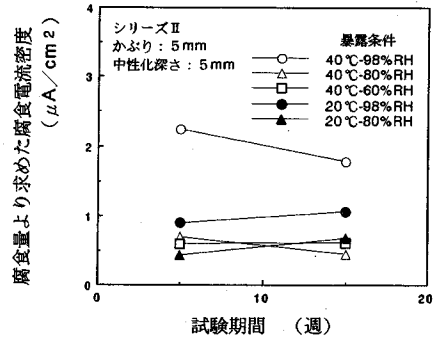


図-12 腐食量から逆算した腐食電流密度の経時変化

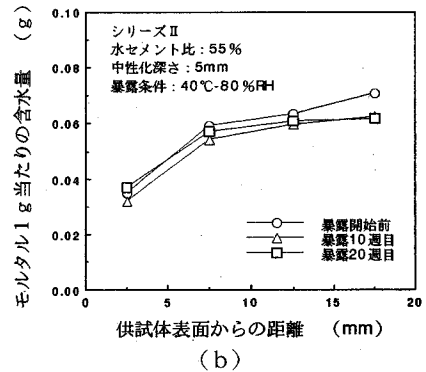
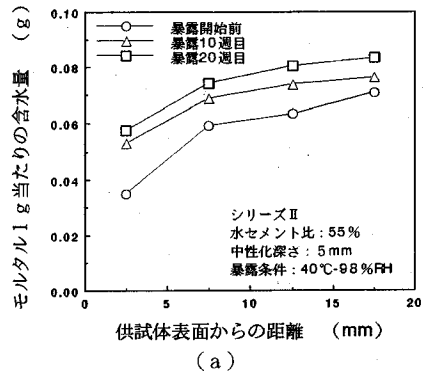


図-13 恒温恒湿暴露試験における供試体中の含水量分布

電流密度は中性化残りを用いて以下のように表わせる。

$$\begin{aligned} Xc < 2 & i_1 = 0.45 \\ 2 \leq Xc < 5 & i_1 = (-Xc + 5.375) / 7.5 \\ Xc \geq 5 & i_1 = 0.05 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Xc : 中性化残り (mm)

i_1 : アノード分極により得られる腐食電流密度 ($\mu A/cm^2$)

なお、図-10には測定した全てのデータが示されている

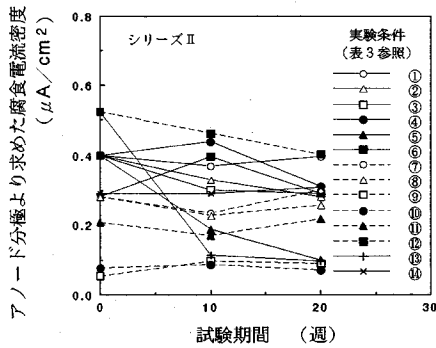


図-14 アノード分極より得られた腐食電流密度の経時変化

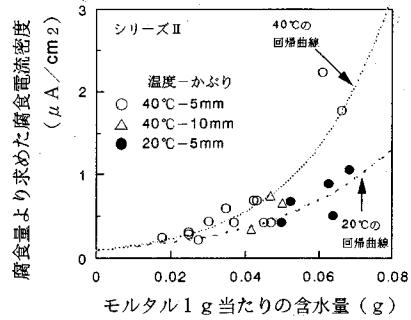


図-15 鉄筋位置の含水量と腐食電流密度の関係

ることから、式(1)は本実験条件の範囲においては、配合条件、初期養生条件、促進方法、かぶりによらず成り立つものと考えられる。

(2) 湿度が腐食速度に及ぼす影響

環境条件が腐食速度に及ぼす影響について検討するには、アノード分極によって得られた腐食電流密度を用いることはできず、異なる湿度における腐食速度を比較する必要がある。そこで、シリーズIIの実験における、実際の腐食量からFaradayの法則を用いて逆算した腐食電流密度を用いて検討を加えることとする。

図-12にシリーズIIの腐食量から逆算した腐食電流密度の経時変化の一例を示す。腐食電流の計算は、腐食量測定間隔(10週間)ごとに行った。図より、アノード分極で得られる腐食電流密度は中性化残りが2mm程度以下においてはほとんど同じ値となっているのに対し、実際の腐食速度は暴露される環境によって大きく異なっている。具体的には、供試体保存環境の温度および湿度が高いほど腐食電流密度が大きくなっており、環境条件が腐食速度に及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。

なお、計算した腐食電流密度は10週間の平均腐食速度と見なされるが、試験中の供試体の含水率が大きく変化している場合はその値が実質的な意味を持たないと考えられる。図-13に供試体の含水量(絶乾のモルタル1gに対する水分量)分布の一例を示す。図より、試験開始から10週目までは若干の増加が見られるものの、10週から20週目まではほとんど変化が見られないことが確認できる。また、図-14はアノード分極によって求めた腐食電流密度の経時変化を示したものであるが、促進中性化試験終了時の腐食電流密度から大きな変化は見られない。従って、中性化の程度から決まる不動態被膜の基本的な状態も大きく変化していないものと考えられる。しかし、福島らの研究¹⁵⁾では腐食速度は時間とともに減衰していく結果となっている。腐食速度が低下するのは、腐食生成物層が鉄イオンや溶存酸素の拡散を妨げること¹⁴⁾、酸素の拡散速度が律速になる程度にかぶりが

大きいこと等が原因として考えられるが、本研究の腐食量の程度やかぶりの範囲においては腐食速度は一定と見なすことができると思われる。

湿度が腐食速度に影響を及ぼすのは、供試体内の含水率に影響を及ぼすためである。図-15に鉄筋位置の含水量(かぶり5mmの場合は0~5mm部分と5~10mmの部分の含水量の平均、かぶり10mmの場合は5~10mmと10~15mmの平均)と腐食量から求めた腐食電流密度の関係を示す。データは中性化残りが0mm以下のものである。図より、含水量が大きくなるに従って腐食電流密度が大きくなっている。また、両者の関係は以下のような式で表わすことができる。

$$20^{\circ}\text{C} \quad i_c = 0.097 \exp(43.71w_c) \quad (2a)$$

$$40^{\circ}\text{C} \quad i_c = 0.102 \exp(31.96w_c) \quad (2b)$$

ここで、 i_c : 腐食量から逆算した腐食電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

w_c : 鉄筋位置の含水量 (g)

含水量の増加はモルタルの電気抵抗の低下だけでなく、酸素の拡散速度の低下をもたらす¹⁶⁾。即ち、腐食速度を増加させる作用と低下させる作用の両方を持っていることになるが、腐食電流密度は含水量の増加とともに単調に増加している。従って、図中のデータの含水量の範囲においては、電気抵抗の低下による影響が支配的であるものと考えられる。また、中性化が進行するには、コンクリート内の水分がある程度逸散し、二酸化炭素の拡散に有効な水で満たされていない空隙が存在することが必要である。従って、中性化の進行による鉄筋の腐食が問題となる環境では、酸素の拡散が著しく阻害されるような高含水率のコンクリートがそれほど存在するとは考えられず、電気抵抗が腐食に及ぼす影響が大きいものと考えられる。

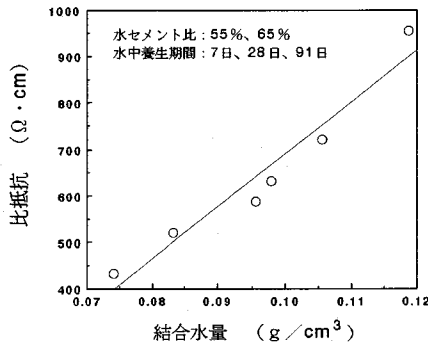


図-16 結合水量と比抵抗の関係

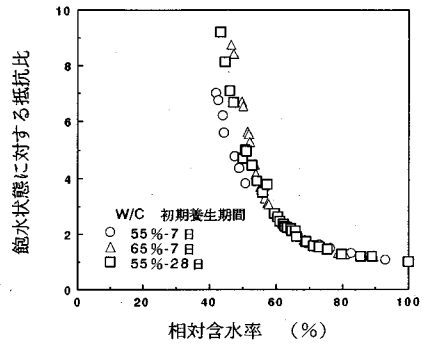


図-17 相対含水率と比抵抗の関係

(3) 温度が腐食速度に及ぼす影響

温度の上昇は一般に化学反応速度を増加させる。腐食においても、温度の上昇とともに腐食速度が増加するとされているが、温度が80℃以上の場合には酸素の溶解度が低下するため、腐食速度が低下する¹⁴⁾。本研究の実験条件および自然状態においてもコンクリート中の鉄筋が80℃以上で腐食することは稀であるため、温度が高いほど腐食速度も大きくなると考えて良いものと思われる。

図-15より、実験においても供試体の含水量が同じ場合、温度が高い方が腐食電流密度が大きくなっている。

5. 鉄筋の腐食の進行予測

ここでは、これまで検討してきた中性化による鉄筋の腐食性状を踏まえ、中性化による鉄筋腐食モデルを構築し、腐食の進行予測を行う。

(1) モルタルの電気抵抗と腐食速度の関係

4. (2) では含水量によって腐食速度を評価したが、ここでは含水量を電気抵抗に変換して腐食速度の検討を行うこととする。

図-15で用いた含水量は、絶乾のモルタル1gに含まれる水分量である。このため、配合の違いや炭酸化による組織の緻密化によって変化する空隙量の情報は間接的にしか含まれておらず、電気抵抗と含水量は一対一に対応しないと考えられる。従って、まず、モルタルの諸性状と電気抵抗の関係を定式化することとした。

モルタルの電気抵抗は配合条件や水和の進行程度、含水率の影響を受ける⁹⁾。図-16はモルタル1cm³当たりの結合水量と飽水状態のモルタルの比抵抗の関係を示したものである。図より、結合水量と比抵抗は直線関係にあり、水セメント比や材齢によらず、両者の関係は以下のような式で表わすことができる。

$$R_H = -430 + 11200X \quad (3)$$

ここで、 R_H : 飽水状態のモルタルの比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
 X : 結合水量 (g/cm^3)

結合水量により比抵抗を推定できるのは、細孔量と結合水量に関連があるためと考えられる。本研究で用いたモルタルの細孔量と結合水量の関係は以下の式で与えられる⁷⁾。

$$V = 0.43 \times 10^{-412X} \quad (4)$$

ここで、 V : 75~75000 Åの細孔量 (cc/cc)

そこで、式(3)と(4)より、細孔量と比抵抗の関係を求めると以下ようになる。

$$R_H = -430 - 2710 \log(V/0.431) \quad (5)$$

水和による抵抗変化も炭酸化反応による抵抗変化も空隙量の変化のみが影響すると仮定すると、上式により水和の進行による影響だけでなく、炭酸カルシウムの生成による細孔量の変化に伴う比抵抗の変化も推定できることになる。なお、炭酸カルシウム生成による細孔量の変化は中性化進行予測の過程で得られる¹⁷⁾。

次に、含水率と比抵抗の関係について検討する。図-17に真空デシケータ内で乾燥を行った供試体の相対含水率(飽水状態における水分量に対するその時点の水分量の比)と飽水状態の比抵抗に対する抵抗比の関係を示す。また、両者の関係は、実験の範囲では配合や初期養生条件によらず以下ようになる。

$$R_w = 49.4 - 1.66w + 0.0195w^2 - 0.0000764w^3 \quad (6)$$

ここで、 R_w : 飽水状態の比抵抗に対する抵抗比
 w : 相対含水率 (%)

電気抵抗の温度補正については小野らの研究¹⁸⁾を参

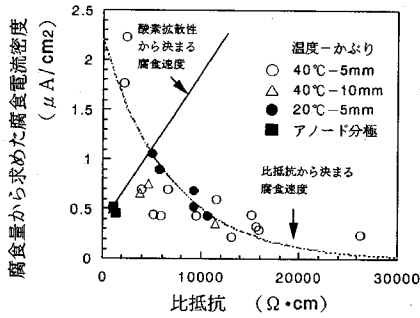


図-18 鉄筋位置の比抵抗と腐食電流密度の関係

考にして、以下のような式で行った。

$$R_T = 2.5 \times 10^{-0.02T} \quad (7)$$

ここで、 R_T : 20°Cの抵抗を基準とした温度補正係数
 T : 温度(°C)

以上の検討より、モルタルの比抵抗は最終的に以下のような式で表わされる。

$$R_m = R_H \times R_w \times R_T \quad (8)$$

ここで、 R_m : モルタルの比抵抗(Ω・cm)

図-18にシリーズIIにおける鉄筋位置の比抵抗と腐食量より求めた腐食電流密度の関係を示す。比抵抗は式(8)により計算した。図より、比抵抗の低下にともない腐食電流密度が増加しており、腐食電流密度は比抵抗の関数として以下のような式で表わすことができる。

$$i_{cor} = 2.2 \times 10^{-0.00064R_m} \quad (9)$$

ここで、 i_{cor} : 腐食電流密度(μA/cm²)

また、含水量を比抵抗に変換することにより、温度の違いによらず一つの式で腐食電流密度を評価できる。温度が腐食速度に影響を及ぼすのは電気抵抗を変化させる他に、腐食反応速度そのものの変化、酸素の拡散速度の変化、酸素の細孔溶液への溶解度の変化等をもたらすためと考えられるため、比抵抗により腐食速度を評価することは、圧縮強度により間接的に中性化速度を評価すること¹⁹⁾と同様な意味を持つものと考えられる。

(2) 酸素の供給速度と腐食速度の関係

シリーズIIにおける腐食速度は鉄筋位置のモルタルの比抵抗によって評価することができ、酸素の供給につい

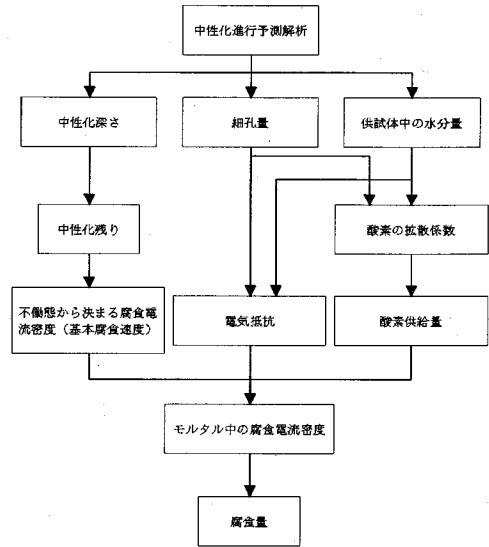


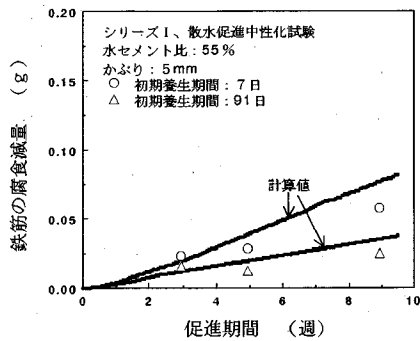
図-19 腐食進行予測のフローチャート

ては考慮する必要は無い。これは、供試体がある程度乾燥していることとかぶり小さいことが原因と考えられるが、腐食モデルに一般性を持たせるには酸素の供給速度の影響を考慮する必要があると思われる。

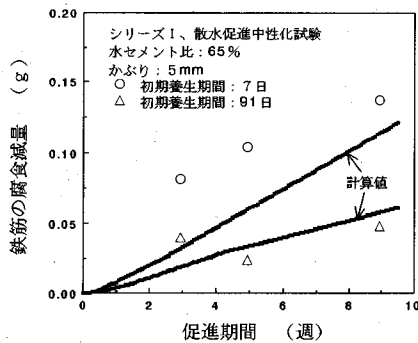
図-18中の■はアノード分極によって得られた腐食電流密度と比抵抗の関係を示したものであるが、腐食量から求めた腐食電流密度より値が小さくなっている。アノード分極によって得られる腐食電流密度は、24時間水中浸漬の後、水中で測定されたものであるため、電気抵抗が小さくなっている反面、酸素供給速度が小さくなる条件での腐食速度を表わすものである。このことから、酸素の供給速度を無視することはできないものと考えられる。図中の直線は酸素の供給速度のみから決まる腐食電流密度を示すものである。即ち、鉄筋表面の酸素濃度を0と仮定し、水で満たされていない細孔の容積からかぶり部分のモルタルの酸素の拡散係数を求め¹⁷⁾、種々の含水状態における酸素供給速度比を計算し、アノード分極によって得られる腐食電流密度の点を通るように引いたものである。この直線は比抵抗が大きくなるに従って、つまり、酸素の拡散に有効な水で満たされていない細孔の容積が増加するに従って、腐食速度が大きくなることを示している。また、比抵抗で決まる腐食速度を表わす曲線と5000Ω・cm付近で交差しており、この程度の比抵抗で腐食速度が最大となることを示している。腐食速度が最大となるとき相対含水率は70~80%程度であり、Lopezらの実験結果¹⁰⁾とも一致する。

(3) 腐食進行予測モデル

鉄筋の腐食モデルについては、塩害についての研究



(a)



(b)

図-20 腐食量予測結果

で、アノード・カソード面積比や腐食電流の経路等について詳細に検討したものが見られるが^{(20)・(21)}、本研究ではこれらの検討を行っておらず、複雑なモデル化を行ってもモデル中のパラメータの値を合理的に与えることができないため、(1)および(2)で検討した比抵抗と酸素の影響のみを考えることとした。具体的には、中性化進行予測手法¹⁷⁾により、鉄筋位置における細孔量および含水率を求め、式(9)によって腐食電流密度を計算することとした。また、同時に酸素の拡散についても計算し、酸素の供給速度によって決まる腐食速度が比抵抗によって決まる腐食速度より小さい場合には、酸素の供給速度から決まる腐食速度を鉄筋の腐食速度とした。

なお、式(9)は中性化残りが2mm以下であり、不働態被膜の状態から決まる腐食速度が中性化残りに依存せず、一定となった場合の実験結果から求められたものである。従って、中性化残りが大きく、一定の腐食電流密度になっていないところでは、アノード分極によって得られた値との比率を用いて以下のように腐食速度を計算することとした。

$$i_{cor}' = i_{cor} \times (i_1 / 0.45) \quad (10)$$

ここで、 i_{cor}' : 計算に用いる腐食電流密度 ($\mu A/cm^2$)

i_{cor} : 式(9)によって求められる腐食電流密度 ($\mu A/cm^2$)

i_1 : 式(1)によって求められる腐食電流密度 ($\mu A/cm^2$)

(4) 鉄筋腐食進行の予測結果

中性化進行予測手法¹⁷⁾に本章で検討した鉄筋の腐食モデルを組み合わせ、促進試験中の鉄筋腐食進行予測を行った。予測手法のフローを図-19に示す。

図-20にシリーズIで散水促進中性化試験を行った場合の鉄筋の腐食減量の予測結果を示す。図より、計算による腐食減量は、促進1週目程度からほぼ直線的に増加しており、森永の実験結果と類似している²⁰⁾。また、実験値と計算値はほぼ一致しており、配合条件および初期養生条件が腐食減量に及ぼす影響も評価できている。従って、本予測手法は基本的に妥当であると考えられる。

なお、本研究で行った実験は、中性化による鉄筋腐食について基礎的な検討を行う目的で、みがき丸鋼を用いているが、ミルスケールのついた異形棒鋼とは鋼表面の状態が大きく異なっていることから、特に腐食速度については本研究の結果を通常の異形棒鋼にそのまま適用できない可能性がある²²⁾。従って、実構造物における鉄筋の腐食について検討する場合には、みがき丸鋼と異形棒鋼の腐食特性の対応を別途検討する必要があると思われる。

6. 結論

本研究では、中性化によるモルタル中の鉄筋の腐食性状を明らかにするため、鉄筋を埋め込んだモルタル供試体を作製し、促進中性化試験および散水促進中性化試験を行って検討を加えた。本研究の範囲で得られた結論をまとめると、以下ようになる。

(1) 本研究の条件(かぶり: 5~10mm)においては、腐食が開始する時点の中性化残りは3mmである。

(2) モルタルの乾燥状態が腐食に及ぼす影響は大きく、相対湿度を50%に保つ促進中性化試験を継続した場合は、鉄筋の腐食が見られない。

(3) アノード分極によって得られる腐食電流密度、即ち、中性化の程度だけから決まる腐食速度は、配合、初期養生条件、かぶりおよび中性化の促進方法によらず中性化残りによって評価できる。また、本研究の条件においては、中性化残りが2mm以下の場合腐食速度が一定となる。

(4) 実際の腐食速度は中性化の進行程度に加え、周囲の湿度や温度の影響を受け、特に、湿度の影響が大き

い。腐食電流密度は鉄筋位置のモルタルの含水量により評価でき、鉄筋位置のモルタルの電気抵抗を用いることにより、含水量と温度が腐食速度に及ぼす影響を同時に評価できる。

(5) 中性化残り、電気抵抗および酸素の供給速度を考慮した腐食モデルを、中性化進行予測手法と組み合わせることにより、実験における腐食量を予測できた。従って、本研究の手法により中性化の進行に伴う鉄筋の腐食進行を予測することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 岸谷孝一, 櫻野紀元: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究-その1-コンクリートの中性化深さが鉄筋腐食に及ぼす影響について, 日本建築学会論文報告集, No.283, pp.11-16, 1979.9.
- 2) 長滝重義, 大賀宏行: フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期試験研究(そのⅢ), 東京工業大学 土木工学科研究報告, No.38, pp.15-30, 1987.12.
- 3) 例えば, Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structure -Theory. Application-, *Journal of the Structural Division*, Vol.105, pp.1137-1166, 1979.
- 4) 佐伯竜彦, 長滝重義, 大賀宏行, 高見浩之: 降雨により水分の供給を受けるコンクリートの中性化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.609-614, 1991.
- 5) 大即信明, 中下兼次, 長滝重義: 塩分環境下におけるセメント硬化体中の鋼材腐食に及ぼす混和材の影響, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.538-543, 1991.
- 6) Gonzalez, J.A., Algaba, S. and Andrade, C.: Corrosion of Reinforcing Bars in Carbonated Concrete, *British Corrosion Journal*, Vol.15, No.3, pp.134-139, 1980.
- 7) 佐伯竜彦, 米山紘一, 長滝重義: 初期養生以降のセメントの水和の影響を考慮した中性化進行予測, 土木学会論文集, No.508, pp.33-44, 1995.2.
- 8) 森永 繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 清水建設研究報告書別冊, No.23, 1988.6.
- 9) 鎌田英治, 田畑雅幸, 中野陽一郎: コンクリート内部の含水量の測定, セメント技術年報, No.30, pp.288-292, 1976.

- 10) Lopez, W. and Gonzalez, J.A.: Influence of the Degree of Pore Saturation on the Resistivity of Concrete and the Corrosion Rate of Steel Reinforcement, *Cement and Concrete Research*, Vol.23, No.2, pp.368-376, 1993.
- 11) ASTM C876-80: Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete
- 12) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義: 暴露中のセメントの水和の進行がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響, コンクリートの炭酸化に関するシンポジウム論文集, pp.39-46, 1993.4.
- 13) Brown, R.D., Geoghegan, M.P. and Barker, A.F.: Analysis of Structural Condition from Durability Results, *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Ellis Horwood Limited, pp.193-222, 1983.
- 14) 伊藤伍郎: 腐食科学と防食技術, コロナ社, 1979.
- 15) 福島敏夫, 友沢史紀, 福士 勲, 田中 斉: コンクリートの中性化に伴う鉄筋腐食進行に対する表面仕上材の抑制効果の定量的評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.477-482, 1990.
- 16) 小林一輔, 出頭圭三: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学, Vol.24, No.12, pp.91-106, 1986.12.
- 17) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No.414, pp.99-108, 1990.2.
- 18) 小野博宣, 大岸佐吉, 文堅: コンクリートの電気抵抗に及ぼす試験条件および作用応力の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.441-446, 1991.
- 19) 長滝重義, 大賀宏行, 佐伯竜彦: コンクリートの中性化深さの予測, セメント技術年報, No.41, pp.343-346, 1987.
- 20) 関 博, 山本英夫: コンクリート中鉄筋における腐食速度の解析に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.381-386, 1987.
- 21) 武若耕司, 小林一輔: 自然電位法の非破壊的鉄筋腐食検査手法への実用化について, コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集, pp.79-84, 1988.5.
- 22) 宮川豊章, 松村卓郎, 小林和夫, 藤井 学: 鋼材腐食からみたコンクリート中での酸素透過性の検討, 土木学会論文集, No.408, pp.111-120, 1989.8.

(1994.11.25受付)

QUANTITATIVE ESTIMATION OF STEEL CORROSION IN MORTAR DUE TO CARBONATION

Tatsuhiko SAEKI, Nobuaki OTUKI and Shigeyoshi NAGATAKI

The purpose of this study is to estimate of the rate of steel corrosion in the carbonated mortar. An accelerated carbonation test and a cyclic accelerated carbonation and water-spray test were performed with the mortar specimens embedded steel bar. The amount of steel corrosion, electro-chemical properties, - potential and corrosion current of steel bar, resistivity of mortar -, were measured.

The corrosion rate of steel bar depends on the depth of carbonation, resistivity of mortar and diffusivity of oxygen. And the resistivity depends on the degree of hydration and carbonation, the water content of mortar and temperature.

Based on these results, the corrosion model was proposed. The amount of steel bar in mortar due to carbonation can be predicted by using this model.