

論文 中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係

酒井 正樹*1・神代 泰道*2・小林 利充*2

要旨：中性化後の鉄筋腐食を考慮した RC 造建築物の寿命評価について検討するため、促進中性化試験により鉄筋位置まで中性化させた試験体を異なる相対湿度で 61～571 日間暴露し、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係を検討した。その結果、次のことがわかった。(1)試験体を異なる相対湿度に暴露した結果、鉄筋位置の平均含水率は 2.8～4.3%となった。(2)かぶり厚さが 20mm, 30mm では、鉄筋位置まで中性化が進行しても、鉄筋位置の含水率が 4%を下回れば不動態状態と同等と評価できる。(3)相対湿度 100%R.H.の環境に相当する鉄筋位置の含水率が 4%を上回る場合でも、中性化後の鉄筋腐食速度は低～中程度と比較的小さい。

キーワード：中性化, 含水率, 鉄筋腐食, 黒皮, 自然電位, 腐食電流密度

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造建築物の維持管理および寿命評価の高度化が求められている。実構造物では、供用期間中に乾燥の影響を受けることで中性化の進行速度が大きくなる一方、中性化が進行しても乾燥により含水率が低い部位では鉄筋腐食はほとんど生じていない^{例えは 1)}。そのため、コンクリートの含水状態に着目し、中性化が進行した後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価を行うことは合理的といえる。

古賀ら²⁾は、築 38 年経過した高濃度の塩化物を含有する壁式 RC 造建築物を調査し、鉄筋の腐食限界と言われる $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を超える塩化物イオンを含有しても、コンクリートの質量含水率が 3.5%以下であれば、鉄筋腐食は生じないことを報告している。米澤ら³⁾は、鉄筋位置まで中性化を進行させた試験体を異なる相対湿度に暴露し、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係について検討している。また、近年では、学協会においてもコンクリートが中性化した後の鉄筋腐食に基づいた寿命評価の考え方について議論⁴⁾がなされている。

本研究は、中性化後の鉄筋腐食を考慮した RC 造建築物の寿命評価について検討するため、促進中性化試験により鉄筋位置まで中性化させた鉄筋コンクリート試験体を異なる相対湿度で 61～571 日間暴露し、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係を検討したものである。

2. 実験計画

実験計画の概要を表-1 に示す。試験体寸法は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とした。促進中性化試験および中性化後の暴露試験では、側面 1 面のみを暴露面とし、外周 3 面と小口面はエポキシによりシールした。試験体の内部には、

かぶり厚さが 10, 20, 30mm の位置に黒皮付き丸鋼 $\phi 12\text{mm}$ (SS 400) を設置した。試験体の作製後は、前養生として 5 日間の封かん養生、その後 9 日間の気中養生を行い、促進中性化試験を開始した。促進中性化試験は、温度 20°C 、相対湿度 60%R.H., CO_2 濃度 5%の環境とし、中性化残りが -10, ± 0 , +12mm となるまで行った。中性化後の暴露条件は、乾湿繰返し、相対湿度 100%R.H., 90%R.H., 75%R.H., 60%R.H.の 5 水準を設定した。なお、暴露試験の期間は 61～571 日間とした。

3. 実験方法

3.1 試験体の作製およびコンクリートの基礎性状

コンクリートの使用材料を表-2, 調合を表-3 に示す。セメント種別は高炉セメント B 種とした。水セメント比

表-1 実験計画の概要

項目	内容
試験体概要 (写真-1)	試験体寸法: $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 境界条件: 側面 1 面のみ暴露面, 外周 3 面と小口面はシール
鉄筋概要	鉄筋種類: 黒皮付き丸鋼 $\phi 12\text{mm}$ (SS 400) かぶり厚さ: 10, 20, 30mm
前養生方法	20°C 封かん 5 日間 + 20°C 気中 9 日間
促進中性化 試験条件	環境条件: 温度 20°C , 相対湿度 60%R.H., CO_2 濃度 5% 期間: 中性化残りが -10, ± 0 , +12mm となるまで(詳細は後述する図-2 を参照)
中性化後の 暴露条件	(1)乾湿繰返し (2)相対湿度 100%R.H. (3)相対湿度 90%R.H. (4)相対湿度 75%R.H. (5)相対湿度 60%R.H.

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

は 60%, 単位水量は 180kg/m³ とし, 化学混和剤は AE 減水剤を使用した。なお, 目標スランプは 18.0±2.5cm, 目標空気量は 4.5±1.5% とした。

鉄筋コンクリート試験体の外観を写真-1 に示す。試験体寸法は 100×100×400mm とし, コンクリートの打込み側面の 1 面が暴露面となるように, 鉄筋を予め型枠に固定した。使用した鉄筋は, SS400 の黒皮付き丸鋼φ12mm である。既往の研究では, みがき鋼材を用いた実験が多いが, 実際の建築物では黒皮付きの鉄筋が用いられているため, 黒皮の影響を含めた評価ができるようにした。試験体へのコンクリートの打込みおよび初期養生は 20℃で行い, 材齢 5 日までは封かん養生とした。その後, 材齢 14 日までは気中養生とし, その間に側面 1 面を除いた外周 3 面と小口面をエポキシによりシールした。

コンクリートの基礎性状の試験項目を表-4 に示す。コンクリートのフレッシュ性状として, 練り上がり直後のスランプ, 空気量, コンクリート温度, 単位容積質量, 硬化性状として圧縮強度を測定した。

コンクリートのフレッシュ性状の試験結果を表-5 に示す。スランプ, 空気量ともに目標値を満足した。

コンクリートの硬化性状の試験結果を図-1 に示す。標準養生 28 日における圧縮強度は 30.5 N/mm² となった。本実験では, 目標とする中性化深さの設定値を 20~42mm と変えており, 促進中性化試験期間も 146~741 日と異なっている。そのため, 試験体のかぶりコンクリートの品質確認として, 材齢 5 日で脱型し, 以降は 20℃, 60%R.H. で気中養生した供試体の圧縮強度を測定した。気中養生した供試体では, 材齢 146 日以降の圧縮強度に差異は認められず, 促進中性化期間が異なるものでも, かぶりコンクリートの品質は同等であると考えられる。

3.2 促進中性化試験

促進中性化試験は, JIS A 1153 に準じて行った。促進中性化試験環境は, 温度 20℃, 相対湿度 60%R.H., CO₂ 濃度 5% とした。

鉄筋のかぶり厚さおよび目標とするコンクリートの中性化深さの設定値を図-2 に示す。鉄筋のかぶり厚さは 10, 20, 30mm の 3 水準とし, 鉄筋の下端まで中性化を進行させる No.1, 2, 5 を基本条件とした。また, 鉄筋のかぶり厚さ 30mm については, 中性化残りが +10mm, ±0mm を目標とした No.3, 4 の条件も併せて設定した。

3.3 促進中性化試験後の暴露試験

促進中性化試験後の暴露試験方法を表-6 に示す。目標とする中性化深さに到達した試験体は, 乾湿繰返し, 相対湿度 100%R.H., 90%R.H., 75%R.H., 60%R.H. の 5 水準の暴露環境に置き, 鉄筋腐食速度の経時変化を測定した。乾湿繰返しの条件は, 40℃乾燥 42 時間と 20℃下面吸水 6 時間の繰返しを基本サイクルとした。この条件

表-2 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
セメント	C	高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm ³)
細骨材	S	木更津産陸砂 (表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.90%, F. M. 2.45, 実積率 66.7%)
粗骨材	G	青梅産碎石 (表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.92%, F. M. 6.61, 実積率 58.9%)
水	W	上水道水

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
60	18.0	4.5	49.5	180	300	875	907

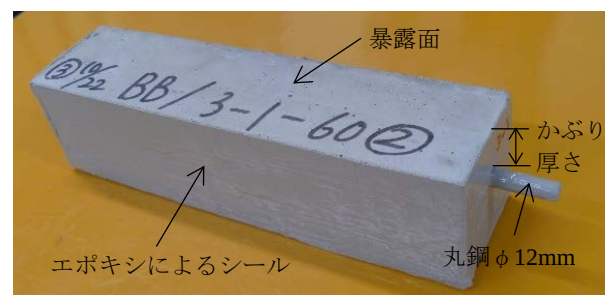


写真-1 鉄筋コンクリート試験体の外観

表-4 コンクリートの基礎性状の試験項目

分類	項目	試験方法
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108

表-5 コンクリートのフレッシュ性状の試験結果

スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	単位容積質量 (kg/m ³)
19.0	4.8	20.0	2305

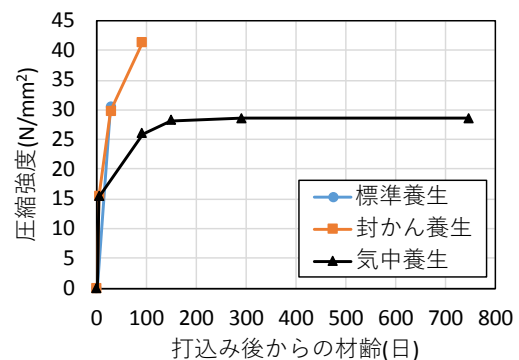
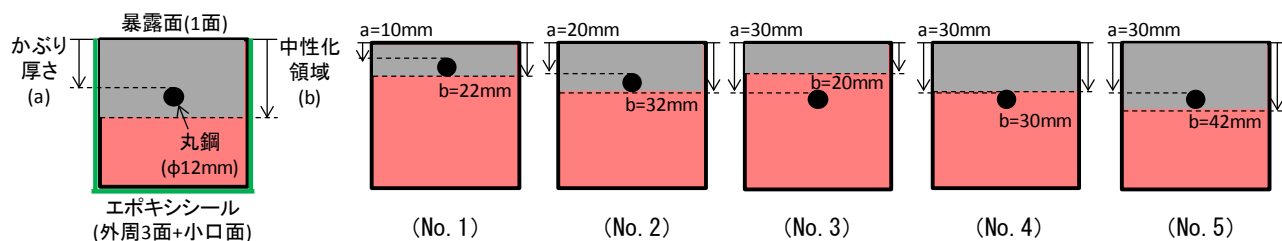


図-1 コンクリートの硬化性状の試験結果



図－2 鉄筋のかぶり厚さおよび目標とするコンクリートの中性化深さの設定値

は、試験体のかぶり厚さの最大値である 30mm の位置まで、乾燥および湿潤の影響が到達するように決定したものである。下面吸水の方法は、試験体の暴露面を下にしてコンテナに静置し、試験体の底から 10mm 程度の高さまで水を張った。相対湿度を変える条件では、温度は 20℃とした。また、いずれの暴露条件においても、酸素濃度は大気中と同等の 21%程度であることを確認した。

3.4 含水率の測定

含水率の測定は、鉄筋を埋設した鉄筋腐食測定用の試験体と同時に、含水率モニタリング用の試験体を作製して行った。含水率モニタリング用の試験体は無筋とし、暴露面他の境界条件、前養生条件、促進中性化試験方法、中性化後の暴露試験方法は、鉄筋腐食測定用の試験体と同様とした。含水率の測定には、試験体を乾式カッターで小口面と平行に 30mm の厚さに切断し、さらにその切断片を暴露面より 12.5mm 間隔で 8 等分したものを試料として用いた。それぞれの試料に対し、JASS 5N T-602 に準じた 105℃乾燥質量に基づく質量法により質量含水率を算定した。

3.5 鉄筋腐食速度の測定

促進中性化試験後の暴露試験では、1～2 ヶ月の測定間隔で、電気化学特性（自然電位および分極抵抗）を測定した。電気化学特性の測定には、市販のポータブル型分極抵抗測定装置（交流インピーダンス法）を用い、10mV の交流電圧を印加して、10Hz～0.01Hz の 7 点の周波数で測定を行った。分極抵抗は、配筋状態とかぶり厚さを考慮した BEM モデルによる電流分布シミュレーションから得られる推定値と鉄筋の真の分極抵抗の関係を用いて算出した⁵⁾。また、分極抵抗から腐食電流密度に換算するための K 値は 0.026V の一定値と仮定した。なお、直近の測定時には、異なる測定手法である CEPRA 法⁶⁾により分極抵抗の測定を行い、交流インピーダンス法による測定結果の妥当性を確認した。

4. 実験結果

4.1 促進中性化試験結果

促進中性化試験結果および暴露試験期間を表－7 に示す。鉄筋のかぶり厚さおよび目標とする中性化深さの設定値により促進中性化試験期間は異なり、No.1 と No.3

表－6 促進中性化試験後の暴露試験方法

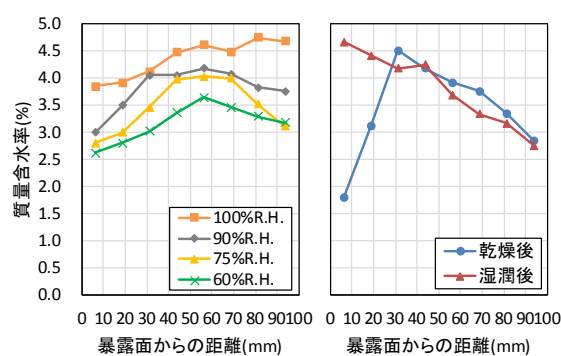
暴露条件	試験方法
乾湿繰返し	乾燥過程：40℃恒温槽・42 時間※ 湿潤過程：20℃下面吸水・6 時間
100%R. H.	底部に水を張ったコンテナ内に静置
90%R. H.	20℃・90%R. H. のプレハブ内に静置
75%R. H.	20℃・75%R. H. のプレハブ内に静置
60%R. H.	20℃・60%R. H. の恒温恒湿室内に静置

※乾燥過程は、3 サイクル毎に 66 時間とした

表－7 促進中性化試験結果および暴露試験期間

No.	a※ (mm)	b※ (mm)	中性化 残り (mm)	促進中性化 期間(日)	暴露試験 期間(日)
1	10	22.4	-12.4	132	526
2	20	34.1	-14.1	234	445
3	30	22.4	+7.6	132	571
4	30	34.1	-4.1	234	451
5	30	44.2	-14.2	727	61

※a はかぶり厚さ、b は中性化領域（詳細は図－2 を参照）



(a) 相対湿度 100～60%R. H. (b) 乾湿繰返し

図－3 暴露開始から約 1 年後の含水率分布（質量法）

（目標とする中性化深さが 20～22mm）では 132 日間、No.2 と No.4（同 30～32mm）では 234 日間、No.5（同 42mm）では 727 日間となった。なお、促進中性化試験期間が異なったため、本報告の範囲となる暴露試験期間も 61～571 日と異なっている。

4.2 含水率の測定結果

促進中性化試験後の暴露試験開始から約 1 年後の質量法による含水率分布を図－3 に示す。相対湿度 100～

60%R.H.では、試験体の表層（暴露面）から内部に至るまで、相対湿度が高いほど含水率が大きくなる傾向となった。乾湿繰返しでは、試験体の表層（暴露面）より 30mm までの範囲で乾燥および湿潤の影響を受けており、乾燥過程の終了時には表層の質量含水率は 1.8%、湿潤過程の終了時には 4.7%程度となった。

図-3 に示す含水率分布から算定した、鉄筋位置における質量含水率の平均値を表-8 に示す。以降、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係の考察には、表-8 に示した含水率を用いることとする。

4.3 自然電位

促進中性化試験後の暴露試験における自然電位の経時変化を図-4 に示す。かぶり厚さが 10mm の No.1, 20mm の No.2 では、暴露試験の開始直後より乾湿繰返し、相対湿度 100%R.H.において自然電位の卑化が認められた。いずれも、ASTM に示される腐食判定基準⁷⁾では、腐食あり (-350mV 以下) と評価された。そこで、それぞれの試験体の一部分から鉄筋を切り出し、目視により鉄筋腐食状況を確認した。

自然電位が卑化した直後の鉄筋腐食状況を写真-2 に示す。比較のため、鉄筋位置まで中性化が到達していない No.3 も併せて確認を行った。かぶり厚さが 10mm の No.1 では、乾湿繰返しと相対湿度 100%R.H.において、若干の点錆が認められた。一方、自然電位が卑化した No.1 の相対湿度 75%R.H.以下およびかぶり厚さが 20mm の No.2 では、いずれの暴露条件においても鉄筋腐食は認められなかった。先に引用した ASTM の腐食判定基準は、長期にわたって供用された RC 造建築物の壁部材の調査結果から設定されており、本実験のようにかぶり厚さが小さい条件では、基準値として適さないものと考えられる。以降の検討においては、コンクリートの含水率が安定し、自然電位の変化が小さくなった時点を初期状態と定義し、初期状態から数百オーダーで自然電位の低下が認められた時点を鉄筋腐食の開始と評価することとした。

かぶり厚さが 30mm の No.3~5 においても、暴露試験の開始直後より乾湿繰返し、相対湿度 100, 90%R.H.の一部で自然電位の卑化が認められたが、鉄筋腐食は確認されなかった。この自然電位の卑化は、異なる相対湿度に暴露したことにより、コンクリートの含水率が変化したことによる値の変動と考えられる。以降、この値を初期状態とし、試験を継続することとした。

以上より、本報告の範囲内では、かぶり厚さが 20mm 以上あれば、中性化深さが鉄筋位置まで到達しても、急激に鉄筋腐食が発生する訳ではないことが確認された。

鉄筋の下端まで中性化させた試験体の鉄筋位置の含水率と自然電位の関係を図-5 に示す。先述のとおり、本実験においては、自然電位の絶対値による鉄筋腐食の

表-8 鉄筋位置における質量含水率の平均値

かぶり厚さ (mm)	鉄筋位置 (mm)	暴露条件					
		乾燥	湿潤	100%	90%	75%	60%
10	10~22	2.8%	4.5%	3.9%	3.4%	3.0%	2.8%
20	20~32	3.9%	4.3%	4.0%	3.8%	3.3%	2.9%
30	30~42	4.3%	4.2%	4.3%	4.0%	3.7%	3.2%

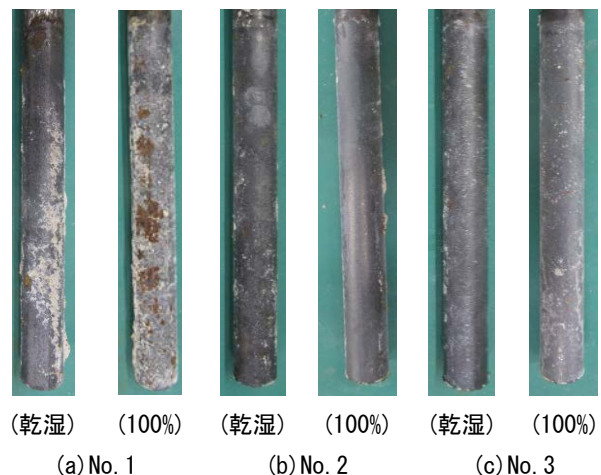


写真-2 自然電位が卑化した直後の鉄筋腐食状況

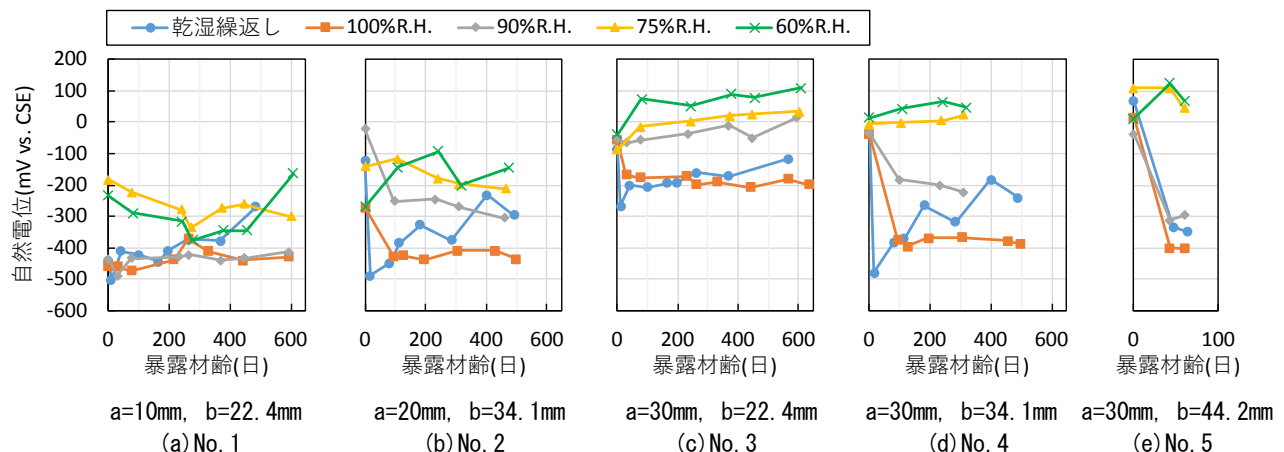


図-4 促進中性化試験後の暴露試験における自然電位の経時変化(a はかぶり厚さ、b は中性化領域)

評価ができないため、初期状態からの自然電位の低下の度合いで鉄筋腐食の開始を評価するのが適切である。そのため、両者の関係について明確な考察を行うことはできないが、鉄筋位置の含水率が高いほど自然電位が低下する傾向は認められた。

4.4 腐食電流密度

促進中性化試験後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化を図-6に示す。図中の白抜きのプロットは、CEPRA法による測定結果を示す。かぶり厚さが10mmのNo.1では相対湿度100, 90%R.H., かぶり厚さが20mmのNo.2では相対湿度100%R.H.で腐食電流密度が大きくなり、RIREMに示される腐食判定基準⁸⁾では、中程度の腐食速度 ($0.5 \sim 1.0 \mu A/cm^2$) と評価された。次いで、No.1の乾湿繰返し、No.4の相対湿度100%R.H.で低い腐食速度 ($0.2 \sim 0.5 \mu A/cm^2$) と評価された。一方、No.1, 2の相対湿度75%R.H.以下およびかぶり厚さが30mmのNo.3~5では、腐食電流密度は無視できるほど小さく、不動態状態と同等 ($0.2 \mu A/cm^2$ 以下) と評価された。

鉄筋の下端まで中性化させた試験体の鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係を図-7に示す。かぶり厚さが10mmのNo.1では、鉄筋位置の含水率が3%を上回ると、かぶり厚さが20mmのNo.2では4%を上回ると、低~中程度の腐食速度 ($0.2 \mu A/cm^2$ 以上) となり、それを下回る含水率では、不動態状態と同等と評価された。古賀ら²⁾は、既存のRC造建築物の調査結果から、質量含水率が3.5%以下であれば、鉄筋腐食は生じないことを報告しており、本実験結果も概ね同様の傾向であると言える。なお、鉄筋位置の含水率が4%を上回るケースは、相対湿度100%R.H.の環境に相当するが、相対湿度が高いと中性化自体が進行しないため、寿命評価の際には問題になりにくいものと考えられる。

以上より、本報告の範囲内では、かぶり厚さが20mm以上あれば、中性化深さが鉄筋位置まで到達しても、鉄筋腐食速度は無視できるほど小さく、不動態状態と同等

と評価できるものと考えられる。

米澤ら³⁾はみがき鋼材を埋設した試験体を作製し、か

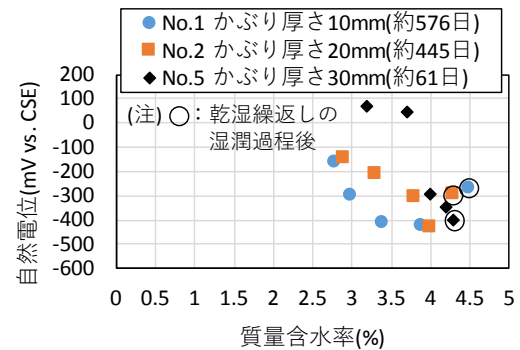


図-5 鉄筋位置の含水率と自然電位の関係

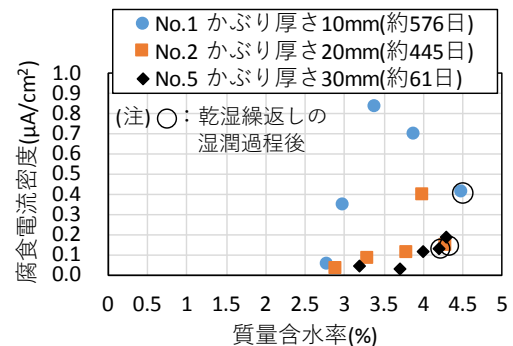


図-7 鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係

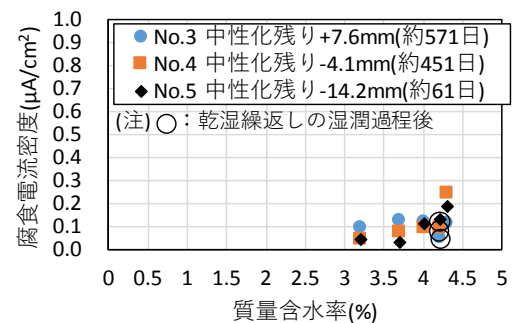


図-8 中性化残りと腐食電流密度の関係

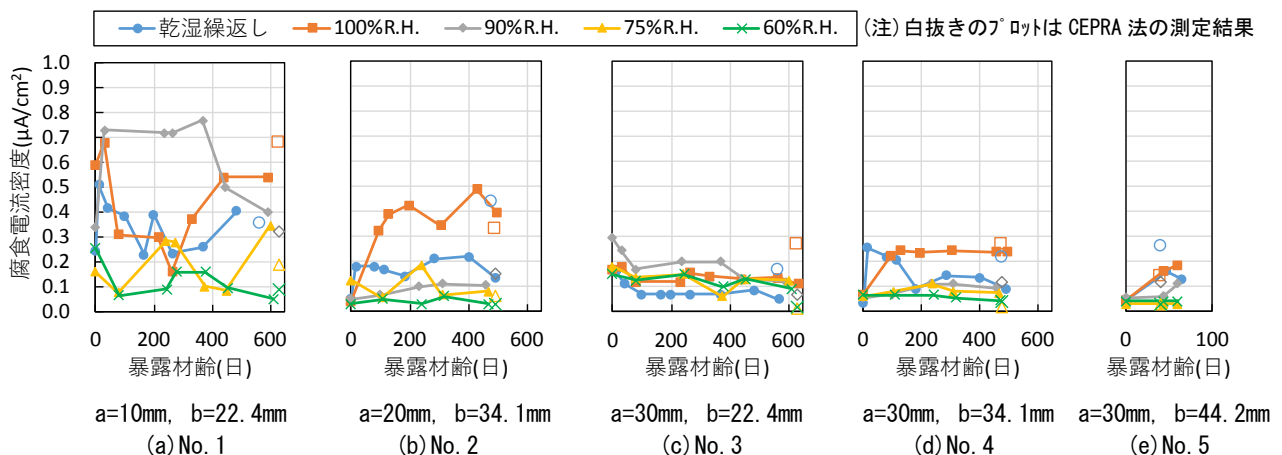


図-6 促進中性化試験後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化 (a はかぶり厚さ, b は中性化領域)

ぶり厚さ 20～50mm の試験体の全断面を促進中性化させた上で、異なる相対湿度で約 1 年半の暴露試験を行い、鉄筋腐食速度と正の相関のある分極抵抗の逆数 ($1/R_{ct}$) を測定した。その結果、相対湿度 40～95%R.H.において、 $1/R_{ct}$ は $0.035 \sim 22.82 \mu A/cm^2$ となった。なお、米澤らは含水率の違いにより異なる K 値を用いて分極抵抗から腐食電流密度を算定しているが、本実験結果との比較検討のため、K 値を 0.026V の一定値と仮定して腐食電流密度を算定すると $0.001 \sim 0.6 \mu A/cm^2$ となる。米澤らは、これらの試験結果について、相対湿度 80, 95%R.H.では、40, 60%R.H.と比較して $1/R_{ct}$ の値が 2～3 オーダー大きくなり、活性な腐食状態であると考察している。みがき鋼材を用いた場合は、コンクリートの含水状態が高くなると、鉄筋腐食速度は急激に大きくなるものと考えられる。

掛川ら⁹⁾は直径 13mm の黒皮付き丸鋼を埋設した試験体を作製し、かぶり部分を促進中性化させた上で、雨掛かりのある屋外環境で 20 年間の暴露試験を行い、鉄筋の腐食減量を測定した。その結果、雨掛かりのある屋外に暴露した後でも、鉄筋の腐食減量はほとんど増加しなかった。みがき鋼材とは異なり黒皮付きの鉄筋を用いた場合は、コンクリートの含水状態が高くなっても、鉄筋腐食速度は小さい状態が維持されるものと考えられる。

本実験結果でも、促進中性化試験後の暴露試験において、相対湿度 90%R.H.以下では不動態状態と同等と評価されており、黒皮付きの鉄筋を用いた掛川らの報告と同様の傾向であると言える。このように、実際の建築物を評価する上では、鉄筋の黒皮の影響の適切な評価が今後の課題とされる。

かぶり厚さが 30mm の No.3～5 の中性化残りと腐食電流密度の関係を図-8 に示す。なお、鉄筋の下端まで中性化させた No.5 は、促進中性化試験後の暴露試験期間が約 61 日と短いため、比較のための参考扱いとして考察を行う。中性化が鉄筋位置まで到達していない No.3, 4 では、鉄筋位置の含水率に関わらず腐食電流密度は無視できるほど小さく、不動態状態と同等 ($0.2 \mu A/cm^2$ 以下) と評価された。また、中性化が鉄筋位置まで到達した No.5 においても、鉄筋位置の含水率が 4%を下回ると不動態状態と同等と評価された。

5. まとめ

中性化後の鉄筋腐食を考慮した RC 造建築物の寿命評価について検討するため、促進中性化試験により鉄筋位置まで中性化させた試験体を異なる相対湿度で 61～571 日間暴露し、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係を検討した。その結果、次のことがわかった。

(1) 鉄筋コンクリート試験体を異なる相対湿度に暴露した結果、鉄筋位置の平均含水率は 2.8～4.3%となった。

- (2) かぶり厚さが 20mm, 30mm では、鉄筋位置まで中性化が進行しても、鉄筋位置の含水率が 4%を下回れば不動態状態と同等と評価できる。
- (3) 相対湿度 100%R.H.の環境に相当する鉄筋位置の含水率が 4%を上回る場合でも、中性化後の鉄筋腐食速度は低～中程度と比較的小さい。ただし、相対湿度が高いと中性化自体が進行しないため、寿命評価の際には問題になりにくいものと考えられる。
- (4) 本実験では黒皮付きの鉄筋を用いており、中性化後も相対湿度 90%R.H.以下では不動態状態と同等と評価できる。実際の建築物を評価する上では、鉄筋の黒皮の影響の適切な評価が今後の課題とされる。

参考文献

- 1) 酒井正樹ほか：RC 造建築物の躯体調査に基づく含水率と中性化・鉄筋腐食の進行に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，vol. 39, 2017.7
- 2) 古賀一八，林典男，平田延明：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査，コンクリート工学年次論文集，vol. 30, No. 1, pp. 783-788, 2008.7
- 3) 米澤敏男ほか：コンクリートの中性化後における鉄筋の腐食速度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 704 号，pp.1405-1414, 2014.10
- 4) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考ー中性化は寿命か？ー，2017 年度日本建築学会大会（中国）材料施工部門パネルディスカッション資料，2017.8
- 5) 金田尚志ほか：BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定，コンクリート工学年次論文集，vol. 33, No. 1, pp. 1715-1720, 2011.7
- 6) P. Ghods, O.B. Isgor et al., A practical method for calculating the corrosion rate of uniformly depassivated reinforcing bars in concrete, Materials and Corrosion 58, No. 4, pp.265-272, 2007
- 7) ASTM-C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, <http://www.astm.org/2009>
- 8) RIREM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Test Methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Material and Structures, Vol.37, pp.623-643, Nov. 2004
- 9) 掛川勝ほか：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因に関する長期屋外暴露実験，日本建築学会構造系論文集，第 672 号，pp.143-151, 2012.2