

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 神代 泰 道
小林 利 充

Relationship between Water Content and Rebar Corrosion Rate of Reinforced Concrete Specimen after Concrete Carbonation

Masaki Sakai Yasumichi Koushiro
Toshimitsu Kobayashi

Abstract

Herein, the relationship between water content and rebar corrosion rate of reinforced concrete is studied to predict the lifetime of reinforced concrete buildings. The carbonated concrete by accelerated carbonation test is exposed to several different humid environments, and the corrosion rate of rebar is measured. The conclusion is as follows. (1) Even if carbonation progresses to the position of the rebar, if the water content is lower than 4%, the rebar corrosion rate can be evaluated as equivalent to the passive state. (2) Even when the water content at the position of the rebar is more than 4%, the corrosion rate of rebar after carbonation is small. (3) In this experiment, rebar with black skin is used, and even after carbonation, at a relative humidity of 90% RH or less, it can be evaluated as equivalent to the rebar corrosion rate of the passive state.

概 要

中性化後の鉄筋腐食を考慮したRC造建築物の寿命評価を検討するため、促進中性化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について検討した。その結果、次のことがわかった。(1)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の鉄筋腐食速度と評価できる。(2)相対湿度100%RH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。(3)本試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%RH以下では、不動態状態と同等の鉄筋腐食速度と評価できる。実際の建築物を評価する上では、鉄筋黒皮の影響評価が課題とされる。

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多くが築50年を超え、使用を継続するか、解体するかの判断が迫られる機会が増えている。実構造物を調査すると、供用期間中に乾燥の影響を受けるため中性化の進行速度は大きくなっている。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考えられる。その結果、建築物の使用を継続するという選択がなされれば、サステナビリティの観点からも有益と言える。

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 1.2kg/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を検討するため、促進中性化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について検討したものである。

2. 試験の概要

本研究は、促進中性化および暴露試験期間における含水率分布の測定試験(シリーズI)と鉄筋腐食速度の測定試験(シリーズII)の2つから構成される。

シリーズIの含水率分布の測定試験は、促進中性化および暴露試験期間における、コンクリート中の含水率分布の経時変化の把握を目的とした。含水率分布の測定は、非破壊により含水率の経時変化を測定できる、電極式の含水率センサを用いた方法⁵⁾(以下、電極法という)により行った。

シリーズIIの鉄筋腐食速度の測定試験は、中性化後の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することを目的とした。かぶり厚さの異なる鉄筋コンクリート試験体を製作し、あらかじめ鉄筋位置まで中性化させた後に異なる相対湿度にて暴露試験を行い、鉄筋腐食速度を測定した。なお、本研究では、実際の建築物の評価に繋がるデータの取得を目指し、黒皮付きの鉄筋を使用した。

3. 試験体の製作

3.1 コンクリートの使用材料、調合および基礎性状

コンクリートの使用材料をTable 1、コンクリートの調合をTable 2に示す。セメント種別は、シリーズIでは普通ポルトランドセメント、シリーズIIでは高炉セメントB種を使用した。なお、シリーズIIでは、普通ポルトランドセメントを使用した試験水準も設定したが、促進中性化の進行が遅く、本報告では範囲外とした。シリーズI・IIに共通して、水セメント比は60%、単位水量は180kg/m³程度とし、化学混和剤はAE減水剤を使用した。

コンクリートの基礎性状の試験項目をTable 3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Table 4に示す。スランプの目標値は18.0±2.5cm、空気量の目標値は4.5±1.5%と設定し、いずれも目標値を満足した。

コンクリートの圧縮強度試験結果をFig. 1に示す。鉄筋コンクリート試験体と併せて製作したφ100×200mmの管理供試体の試験結果を示している。標準養生28日における圧縮強度は30.5 N/mm²となった。また、本試験では、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圧縮強度の確認として、材齢5日で脱型し、以降は20℃、60%RHで気中養生した場合の圧縮強度の変化を測定した。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圧縮強度は同等であると考えられる。

3.2 試験体の製作方法

試験体の形状および条件をTable 5に示す。試験体寸法は、100×100×400mmの角柱試験体とした。促進中性化および暴露試験での境界条件は、側面1面のみを暴露面とし、外周3面と小口2面はエポキシ樹脂によりシールした。

シリーズIでは、試験体の内部に含水率測定用の電極センサを埋設した。設置位置は、暴露面から10、20、30、40、50mmの位置とした。試験体の製作にあたっては、暴露面となる側面1面から、所定の設置位置となるように電極センサを型枠側に固定した上で、コンクリートを打込んだ。なお、鉄筋は埋設していない。

Table 1 コンクリートの使用材料

Used Materials of Concrete		
種類	記号	概要
セメント	C1	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
	C2	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%,粗粒率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%,粗粒率6.61,実積率58.9%)
水	W	上水道水

Table 2 コンクリートの調合

Mix Proportion of Concrete							
試験シリーズ	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C1	C2	S	G
I	60	49.5	182	303	—	871	906
II	60	49.5	180	—	300	875	907

Table 3 コンクリートの基礎性状の試験項目

Measurement Items of Fundamental Concrete Properties		
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

Table 4 コンクリートのフレッシュ性状の試験結果

Test Result of Fresh Concrete Properties				
試験シリーズ	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)
I	20.0	4.9	20.0	2266
II	19.0	4.8	20.0	2305

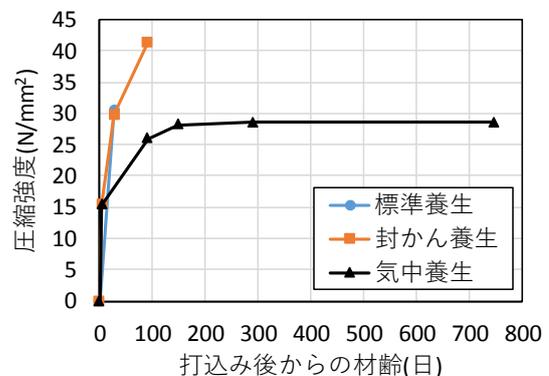


Fig. 1 コンクリートの圧縮強度試験結果
Test Result of Concrete Compressive Strength

シリーズⅡの鉄筋コンクリート試験体の外観をPhoto 1 に示す。試験体の内部には、SS400 の黒皮付き丸鋼φ12mmを暴露面からのかぶり厚さが10, 20, 30mmとなる位置に設置した。試験体の製作にあたっては、暴露面となる側面1面から、所定のかぶり厚さとなるように鉄筋を型枠側に固定した上で、コンクリートを打ち込んだ。なお、既往の研究では、みがき鋼材を用いた試験が多いが、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、本試験では黒皮付きの鉄筋を使用し、その影響を含めた評価ができるようにした。

コンクリートの打込みは、温度20℃、相対湿度60%R.H.の恒温恒湿室で行った。初期養生として、材齢5日まで20℃封かん養生、材齢5日で脱型を行い、材齢14日まで20℃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2面をエポキシ樹脂によりシールした。

4. 試験方法

4.1 含水率分布の測定試験方法(シリーズⅠ)

シリーズⅠの含水率分布の測定は、既報に基づく電極法⁵⁾により行った。この方法は、コンクリート中の任意の測定位置に電極センサを埋め込むことで、非破壊によりコンクリートの含水率と相関のある電極指示値を連続的に測定することができる。本試験では、初期養生(20℃封かん5日間+20℃気中9日間)が終了した材齢14日より、電極指示値の測定を開始した。

初期養生が終了した試験体は、温度20℃、相対湿度60%RHの恒温恒湿室で185日間の乾燥養生を行った。これは、シリーズⅡの促進中性化と同一の乾燥条件となるよう設定したものである。乾燥養生期間は、100×100×400mmの試験体内部の含水率分布の変化が概ね収束すると考えられる185日間と設定した。

所定の乾燥養生期間が終了した試験体は、205日間の暴露試験を行った。暴露試験の方法をTable 6に示す。暴露条件は、乾湿繰返し、相対湿度100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RHの5水準とした。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ことを想定して定めたものである。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て行った。なお、相対湿度を変える条件では温度は20℃とした。

4.2 鉄筋腐食速度の測定試験方法(シリーズⅡ)

4.2.1 促進中性化方法 促進中性化は、JIS A 1153 に準じて行った。促進中性化環境は温度20℃、相対湿度60%RH, 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Fig. 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

Table 5 試験体の形状および条件
Outline of Concrete Specimen

項目	内容
試験体形状	100×100×400mm 角柱試験体
境界条件	側面1面：暴露面 外周3面および小口2面：シール
特徴	シリーズⅠ 埋設物：電極センサ 設置位置：センサ部分が暴露面から10, 20, 30, 40, 50mmとなる位置
	シリーズⅡ 埋設物：黒皮付き丸鋼φ12mm(SS400) 設置位置：暴露面からのかぶり厚さが10, 20, 30mmとなる位置
初期養生	20℃封かん5日間+20℃気中9日間

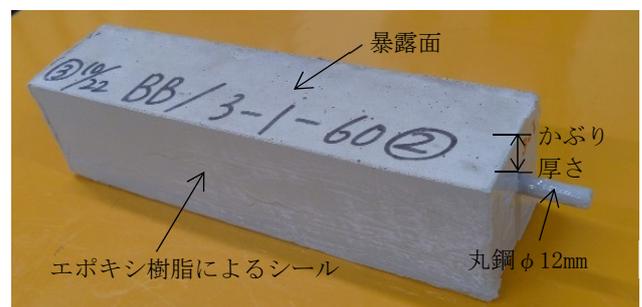


Photo 1 鉄筋コンクリート試験体の外観
Appearance Form of Reinforced Concrete Specimen

Table 6 暴露試験の方法

Exposure Test Method after Accelerated Carbonation Test

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%RHのプレハブ内に静置
75%R.H.	20℃・75%RHのプレハブ内に静置
60%R.H.	20℃・60%RH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

させることを目標としたNo.1, 2, 5を基本条件とした。また、鉄筋のかぶり厚さが30mmのものは、鉄筋の腐食開始時期の目安となる中性化残り(鉄筋のかぶり深さから中性化深さを差し引いた指標)が+10mm, ±0mmとなることを目標としたNo.3, 4の条件も併せて設定した。

4.2.2 暴露試験方法 目標とする中性化深さに到達した試験体から、随時暴露試験を開始し、鉄筋腐食速度の経時変化を測定した。暴露試験方法は、シリーズⅠと同様とした。

なお、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ている。

4.2.3 含水率の測定方法 シリーズⅡの含水率の測定は、JASS 5N T-602に準じた105℃乾燥質量に基づく質

量法により行った。含水率分布を測定するため、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。

質量法による含水率の測定は、乾式カッターによる切断などの作業が必要となる。そのため、鉄筋コンクリート試験体と同時に、無筋の含水率測定用の試験体を製作し、測定に用いた。なお、この含水率試験体の試験体形状、境界条件、初期養生条件、促進中性化方法、暴露試験方法は、鉄筋コンクリート試験体と同一である。

4.2.4 自然電位および分極抵抗の測定方法 促進中性化後の暴露試験では、1~2ヶ月の測定間隔で自然電位および鉄筋腐食速度と相関関係にある分極抵抗を測定した。

自然電位および分極抵抗の測定は、ポータブル型分極抵抗測定装置(交流インピーダンス法)を用いて行った。自然電位の測定は、JSCE-E 601に準じて行った。分極抵抗の測定は、土木学会試案⁶⁾を参考として、10mVの交流電圧を印加して、10Hz~0.01Hzの7点の周波数で見掛けの分極抵抗の測定を行った。その後、既報⁷⁾を参考として、試験体の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を行い、測定された見掛けの分極抵抗から鉄筋の真の分極抵抗へと変換した。

分極抵抗と鉄筋腐食速度の相関関係については、次に示す理論が成り立つとされる。Stern-Gearyの式によると、分極抵抗の逆数($1/\Omega \text{ cm}^2$)と腐食電流密度($\mu \text{ A/cm}^2$)には比例関係が認められ、その時の比例定数(K値)は0.026Vとされる。また、ファラデーの第二法則によると、腐食電流密度($\mu \text{ A/cm}^2$)と鉄筋腐食速度($\text{mg/cm}^2/\text{year}$)には比例関係が認められ、その時の比例定数は9.13とされる。両者を合わせると、分極抵抗と鉄筋腐食速度の相関関係を説明することができる。これらの電気化学的な理論の詳細については文献⁶⁾を参照されたい。本研究では、鉄筋腐食速度を評価する指標として、比例定数(K値)を0.026Vの一定値として算出した腐食電流密度を用いることとした。なお、腐食電流密度については、RILEM(国際材料構造試験研究機関・専門家連合)において鉄筋腐食速度を評価するための判定基準値⁸⁾が示されている。

なお、一部の測定時期においては、異なる測定手法であるCEPRA法⁹⁾による分極抵抗の測定も併せて行い、交流インピーダンス法による分極抵抗の測定結果の妥当性も併せて確認した。

5. 試験結果

5.1 含水率分布の測定試験結果(シリーズI)

乾燥期間における含水率分布の経時変化をFig. 3に示す。乾燥開始時の質量含水率は4.3%程度であった。試験体の表層(暴露面)より30mmまでの範囲では、材齢91日より質量含水率が低下する傾向が見られた。材齢185日の質量含水率は、表層より10mmでは3.1%、20mmでは3.3%と

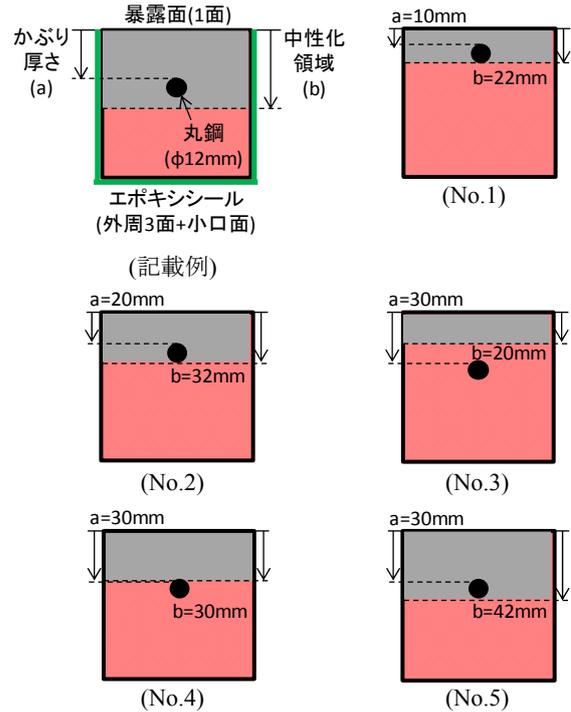


Fig. 2 鉄筋のかぶり厚さおよび目標とするコンクリートの中酸化深さの設定値

Covering Depth and Target Value of Carbonation Depth of Reinforced Concrete Specimen

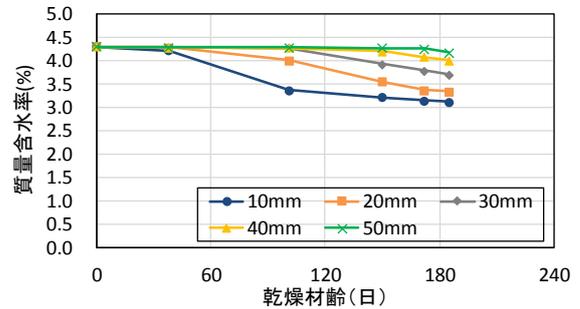


Fig. 3 乾燥期間における含水率分布の経時変化
Water Content Change with Time under Drying Test Period

なり、乾燥開始時からの質量含水率の低下量は1%以上となった。一方、表層より30mm以上の範囲では、乾燥期間の経過に伴い、質量含水率が低下する傾向が認められるものの、乾燥開始時からの低下量は1%以下となった。

乾燥期間後の暴露試験期間における含水率分布の経時変化をFig. 4に示す。相対湿度が100%RHの環境条件では、試験体の表層(暴露面)近傍の含水率が上昇し、全断面にわたって概ね乾燥開始前の水準となった。一方、相対湿度が90%RHでは、試験体の表層近傍において若干の含水率の上昇が見られたが、乾燥開始前の水準までは戻らなかった。相対湿度が75%RH、60%RHでは、試験体の表層近傍においても質量含水率の上昇はほとんど認められず、暴露試験期間も継続して乾燥の進行が認められた。潤の

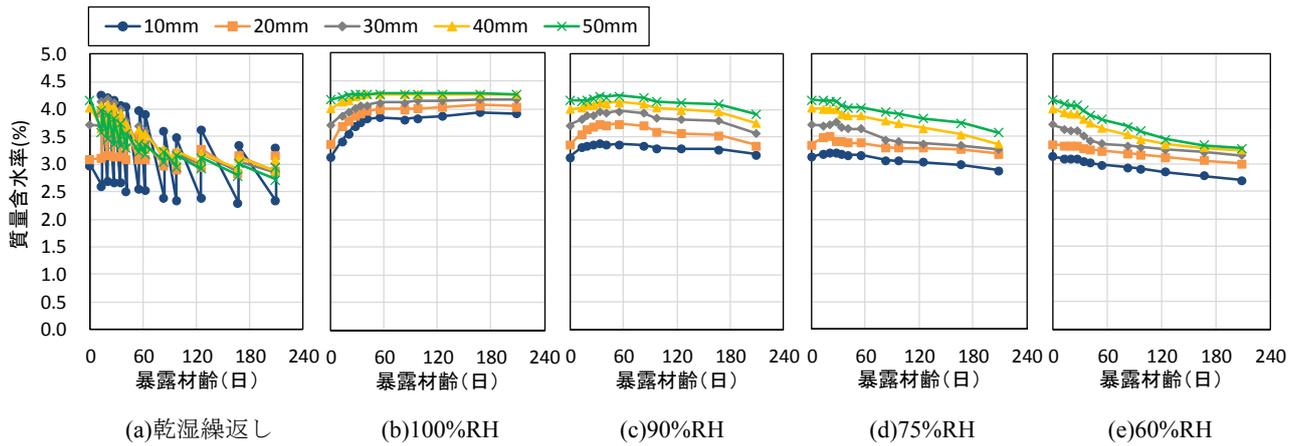


Fig. 4 暴露試験期間における含水率分布の経時変化

Water Content Change with Time under Exposure Test Period

過程において、質量含水率の低下と上昇が認められ、変化量は±1~1.5%と比較的大きかった。一方、表層より乾湿繰返し条件では、表層より10mmでは乾燥および湿20mm以上の範囲でも、同様に質量含水率の低下と上昇が認められたが、その変化量は0.5%程度と小さかった。

本試験結果では、屋外環境を模擬した乾湿繰返し条件であっても、表層からの距離が20mm以上の位置では、含水率の変動が小さかった。実際の建築物の多くは、設計上のかぶり厚さの最小値を30mmと定めていることを鑑みると、鉄筋位置における乾燥や吸水の影響は比較的小さいものと推察される。

5.2 鉄筋腐食速度の測定試験結果(シリーズⅡ)

5.2.1 促進中性化結果 促進中性化結果および暴露試験期間をTable 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(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、本試験は同一期間で実施しているため、促進中性化試験期間が長くなった水準では、暴露試験期間が短くなっている(例えば、促進中性化試験期間が727日の場合、暴露試験期間は61日)。

5.2.2 暴露期間の含水率(質量法) 促進中性化後の暴露試験開始から約1年後の質量法による含水率をFig. 5に示す。相対湿度が100~60%RHの環境条件では、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質量含水率が大きくなる傾向となった。乾湿繰返しでは、表層より20mmまでの範囲で乾燥および湿潤過程において水分のやり取りが生じており、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。

Fig. 5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Table 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、Table

Table 7 促進中性化結果および暴露試験期間

Period of Accelerated Carbonation and Exposure Test					
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Fig. 2を参照)

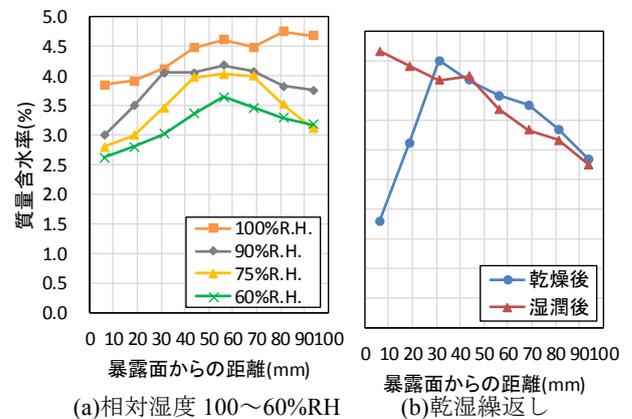


Fig. 5 暴露開始から約1年後の含水率(質量法)

Water Distribution of Concrete after a Year after Starting Exposure Test

Table 8 鉄筋位置における質量含水率の平均値
Water Distribution of Concrete at Rebar Position

かぶり厚さ (mm)	鉄筋位置 (mm)	暴露条件					
		乾燥	湿潤	100% RH	90% RH	75% RH	60% RH
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%

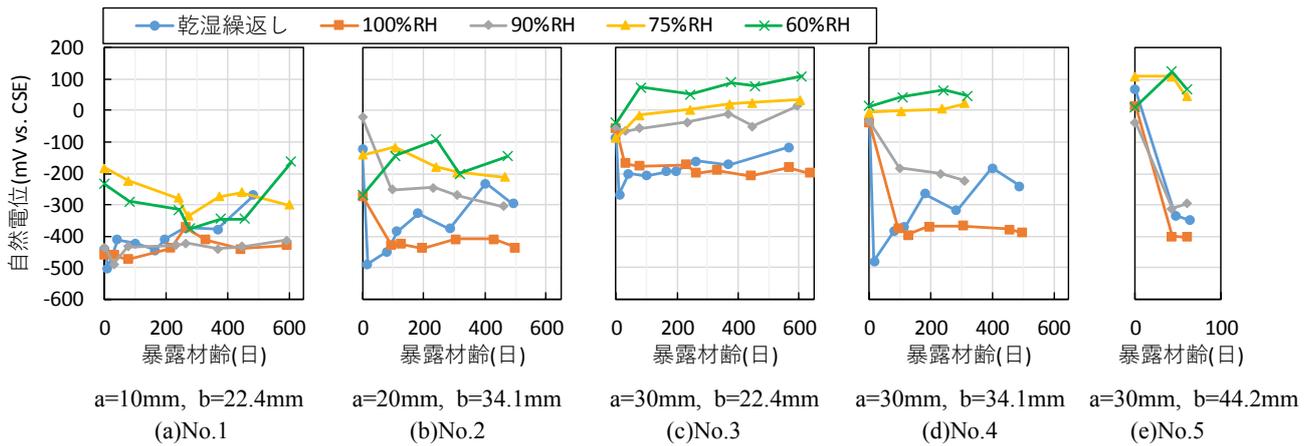


Fig. 6 促進中性化後の暴露試験における自然電位の経時変化(aはかぶり厚さ, bは中性化領域)
 Natural Potential Value Change with Time during Exposure Test after Accelerated Carbonation Test

e 8に示した質量含水率を用いることとする。

5.2.3 自然電位 促進中性化後の暴露試験における自然電位の経時変化をFig. 6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%RHにおいて自然電位の低下が認められた。いずれも, ASTMに示される腐食判定基準¹⁰⁾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。

自然電位が低下した直後の鉄筋腐食状況をPhoto 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%RHにおいて, 若干の点錆が認められた。一方, 自然電位が低下したNo.1の相対湿度75%RH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たもので, 概ね30mm以上のかぶり厚さの測定結果から定められたものと考えられる。そのため, 本試験のかぶり厚さ10mm, 20mmの条件では, 同一の基準値で評価できないと考えられる。

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%RHの一部で自然電位の低下が認められたが, 鉄筋腐食は確認されなかった。この自然電位の低下は, 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。以降の検討では, 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mV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。

以上より, 本報告の範囲内では, かぶり厚さが20mm以上であれば, 中性化深さが鉄筋位置まで到達しても, 急激に鉄筋腐食が進行する可能性は低いことが確認された。

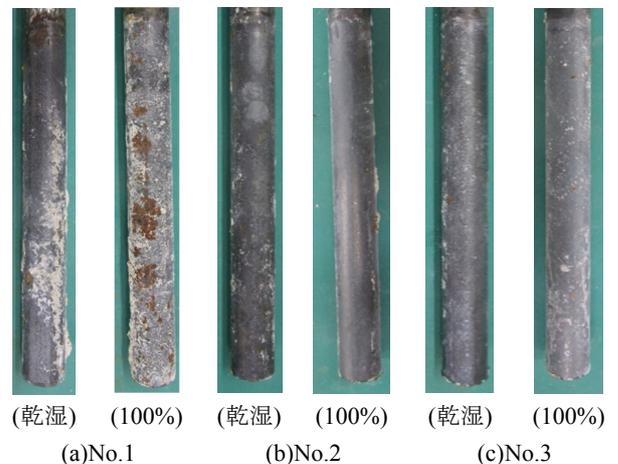


Photo 2 自然電位が低下した直後の鉄筋腐食状況
 Rebar Corrosion Situation Immediately after Natural Potential Degrading

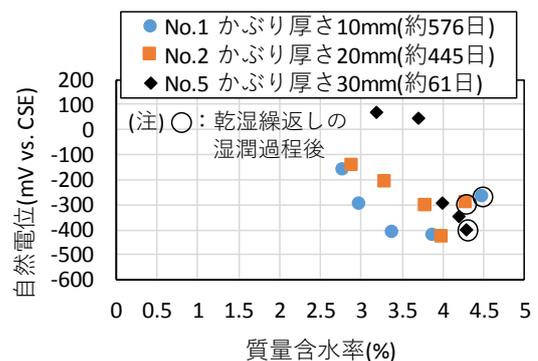


Fig. 7 鉄筋位置の含水率と自然電位の関係
 The Relationship between Water content at Rebar Position and Natural Potential Value

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Fig. 7に示す。先述のとおり, 本試験においては, 自然電位の絶対値による鉄筋腐食の評価は適切でなく, 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こととした。そのため, 鉄

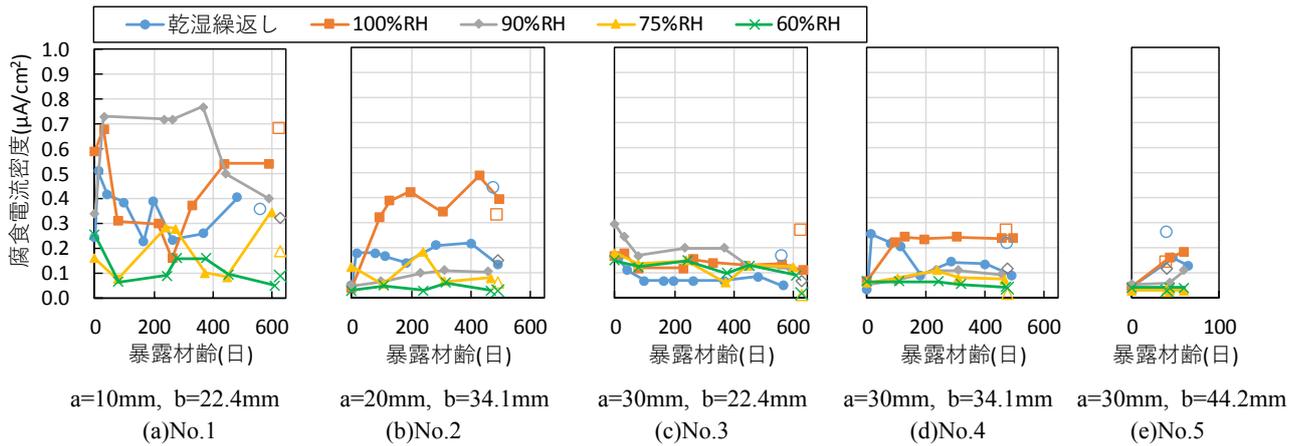


Fig. 8 促進中性化後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化(aはかぶり厚さ, bは中性化領域)
Corrosion Current Density Value Change with Time during Exposure Test after Accelerated Carbonation Test

筋位置の含水率と鉄筋腐食速度の関係は明確ではないが、含水率が高いほど自然電位が低下する電気化学的な傾向は認められた。とりわけ、かぶり厚さ30mmでは、質量含水率が3.5~4.0%を超えると自然電位が大きく低下しているが、これは質量含水率が3.5%以下であれば鉄筋腐食は生じないとした古賀らの既報²⁾と概ね一致しており、鉄筋位置の含水率によって、鉄筋腐食の発生を評価できる可能性があると考えられる。

5.2.4 腐食電流密度 促進中性化後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化をFig. 8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、RILEMに示される腐食判定基準⁸⁾では、中程度の腐食速度(0.5~1.0 μA/cm²)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(0.2~0.5 μA/cm²)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 μA/cm²以下)と評価された。また、本試験で主な測定方法として採用した交流インピーダンス法による腐食電流密度は、CEPRA法による測定値と概ね等しくなっており、本試験の測定結果の妥当性も併せて確認することができた。

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Fig. 9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 μA/cm²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、本試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%RH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

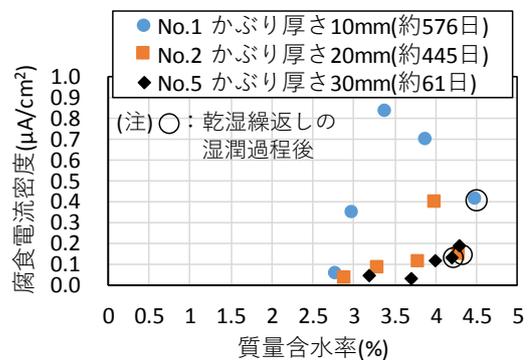


Fig. 9 鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係
The Relationship between Water content at Rebar Position and Corrosion Current Density Value

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製作し、かぶり厚さ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一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/Rct)を測定した。その結果、相対湿度40~95%R.H.において、1/Rctは0.035~22.82 μ/Ωcm²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、本試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0.001~0.6 μA/cm²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/Rct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¹¹⁾は直径13mmの黒皮付き丸鋼を埋設した試験体を製作し、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。

本試験結果でも、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10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 μ A/cm²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。

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、不動態状態と同等の鉄筋腐食速度と評価できるものと考えられる。

6. 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を検討するため、促進中性化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について検討した。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の鉄筋腐食速度と評価できる。
- 3) 相対湿度100%RH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。

本試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%RH以下では不動態状態と同等の鉄筋腐食速度と評価できる。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

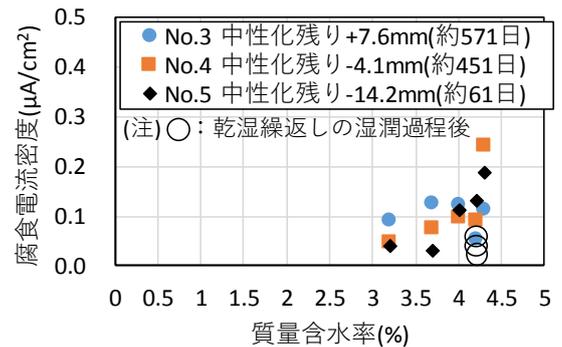


Fig. 10 中性化残り と腐食電流密度の関係
The Relationship between Carbonated Remaining and Corrosion Current Density Value

ンクリート工学年次論文集, vol. 39, 2017.7

- 2) 古賀一八ほか：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—中性化は寿命か？—, 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) 中根淳ほか：コンクリート構造体の含水率測定，セメントコンクリート, No.473, pp.8-14, 1986
- 6) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 86 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)委員会報告書, pp.253-255, 2009.10
- 7) 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
- 8) RILEM 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) 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
- 10) ASTM-C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, <http://www.astm.org/2009>, 2018.9.20
- 11) 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