

RC造建築物の中酸化後の鉄筋腐食速度に関する実験と現地調査

酒井 正 樹 神代 泰 道
植松 俊 幸

Experiment and Site Survey on Rebar Corrosion Rate of RC Buildings after Concrete Carbonation

Masaki Sakai Yasumichi Koushiro
Toshiyuki Uematsu

Abstract

A new durability evaluation method for reinforced concrete buildings considering the progress of rebar corrosion after carbonation is investigated. In this study, an experiment is performed to measure the rebar corrosion rate of carbonated concrete specimens exposed to several different humidity environments. The results indicate that the rebar corrosion rate after carbonation will be low if the concrete is dry. A durability survey of RC buildings that has been in service for a significant amount of time is conducted. Even if the concrete is carbonated, the rebar corrosion barely progressed to indoor members. It is confirmed that the tendency of the rebar corrosion is similar to the experimental results.

概 要

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に対する寿命評価の見直しが求められている。本研究では、コンクリートが中性化した後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目指して、中性化後の鉄筋コンクリート試験体を異なる相対湿度に暴露して、鉄筋腐食速度を測定する実験を行った。実験の結果、相対湿度が低い環境では、コンクリートが乾燥を受けることにより、中性化後の鉄筋腐食速度は小さくなることを確認した。併せて、長期間供用されたRC造建築物の耐久性調査を行った。調査の結果、雨掛かりのない屋内の部材では、コンクリートが中性化した部位でも鉄筋腐食はほとんど認められず、先の実験結果から得られたコンクリートの乾燥程度を考慮した中性化後の鉄筋腐食速度の評価が妥当であることを確認した。

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(以下、RC造という)建築物の多くが建築後50年を経過し、供用を継続するか、解体するかの判断が迫られている¹⁾。既存の建築ストックを継続供用する選択がされると、経済性だけではなく、国連の持続可能な開発サミットで採択された「持続可能な開発目標：Sustainable Development Goals (SDGs)」の観点からも有益と言える²⁾。

一般に、RC造建築物の寿命は、構造材料の観点からは鉄筋腐食を引き起こす要因とされるコンクリートの中性化深さにより評価される。一方、長期間供用された既存のRC造建築物の耐久性調査に関する最近の調査報告では、コンクリートの中性化が鉄筋位置まで進行しても、水分供給がない屋内の部材では鉄筋腐食が進行しないことが示されている^{例えは3)}。これを背景として、日本建築学会では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が議論されている⁴⁾。また、土木学会ではコンクリート標準示方書が改定され、劣化要因が中性化の場合には、鉄筋腐食の要件となるコンクリートの含水状態で耐久性評価を行う考え方が示された⁶⁾。

本研究は、既存のRC造建築物に対して、コンクリート

の中酸化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性予測手法の構築を目的とした。中性化後の鉄筋腐食の進行を予測するためには、コンクリートの含水状態ごとに鉄筋腐食挙動を速度として捉える必要がある。筆者らは、既報⁷⁾にて中性化後の鉄筋腐食速度に関する実験データを時系列で示し、含水率に基づいた定性的な評価を行ってきた。本報では、実験により、コンクリート中の水分の飽和度と内部湿度を新たに測定し、かぶり厚さと含水状態の違いによる中性化後の鉄筋腐食速度の変化を考察した。また、長期間供用されたRC造建築物の耐久性調査を行い、コンクリートの含水率と中性化後における鉄筋腐食速度の関係を確認し、実験結果との比較検討を行った。

2. 実験計画

2.1 実験の流れ

本実験では、暴露面からのかぶり厚さを変えて鉄筋を埋設した試験体を作製した。初期養生後、鉄筋の埋設位置まで促進中性化させた後、異なる暴露条件で暴露を行った。暴露試験では、数ヶ月ごとにコンクリートの含水率および鉄筋の自然電位と分極抵抗を測定した。また、概ね1年ごとに鉄筋の腐食面積率と腐食減量を測定した。

実験の流れをFig. 1に示す。

2.2 実験条件

実験条件をTable 1に示す。試験体の形状は100×100×400mmの角柱とした。促進中性化および暴露試験における試験体の境界条件は、コンクリートの打込み側面1面を暴露面、その他の外周3面と小口2面はエポキシ樹脂によるシールとした。試験体の種類は、非破壊試験で鉄筋腐食速度を測定する有筋試験体と、破壊試験で中性化深さと含水率の測定を行う無筋試験体の2種類とした。有筋試験体には、暴露面からのかぶり厚さが10, 20, 30mmとなる位置にSS400の黒皮付き丸鋼φ12mmを埋設した。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。なお、試験体数は各2体とした。

有筋試験体のかぶり厚さと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とし、埋設した丸鋼φ12mmの下端となる22, 32, 42mmまで中性化を進行させた。なお、鉄筋のかぶり厚さが30mmのものでは、鉄筋位置まで中性化が未到達となる条件を比較用として設定した。設定した中性化深さに到達した試験体から、暴露試験を開始した。暴露試験の環境は、20℃で相対湿度100, 90, 75, 60%RHと乾湿繰返しおよび屋外暴露の6水準とした。暴露試験の環境設定方法は、筆者らの既報⁷⁾と同様とした。なお、全ての暴露条件で、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。

2.3 測定計画

測定計画をTable 2に示す。有筋試験体では、数ヶ月ごとに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、鉄筋の自然電位と分極抵抗を測定した。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、土木学会の338委員会試案⁸⁾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、見掛けの分極抵抗を測定した。ただし、電極から鉄筋に流れる電流分布状況は、配筋条件やかぶり厚さにより変化するため、これらの要因を考慮して見掛けの分

極抵抗から鉄筋の真の分極抵抗を推定する必要がある。そこで、金田らの報告⁹⁾を参考としてBEMモデルによる電流分布シミュレーションを行い、見掛けの分極抵抗を

Table 1 実験条件
Experiment Conditions

項目	内容	
試験体条件	形状	100×100×400mm(角柱)
	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
	種類	(1) 鉄筋試験体：丸鋼φ12mm (かぶり厚さ：10, 20, 30mm) (2) 無筋試験体
環境条件	初期養生	20℃/封かん5日+20℃/気中9日
	促進中性化条件	20℃/60%RH/CO ₂ 濃度5%(JIS A 1153) 中性化深さの目標値：鉄筋下端まで ^{※1}
	暴露条件 [記号]	[調湿] 20℃/100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH, [乾湿] 20℃/乾湿繰返し ^{※2} [屋外] 屋外暴露 ^{※3}

※1：詳細はFig. 2参照。なお、鉄筋の位置まで中性化が未到達となる条件を比較用として設定

※2：乾燥：40℃恒温槽・42時間(実験工程の都合から3サイクル毎に40℃恒温槽・66時間とした)
湿潤：20℃、暴露面を下にして水位を5mmとした水槽に浸漬・6時間

※3：屋外暴露はかぶり厚さ20mmと30mmの2水準のみ

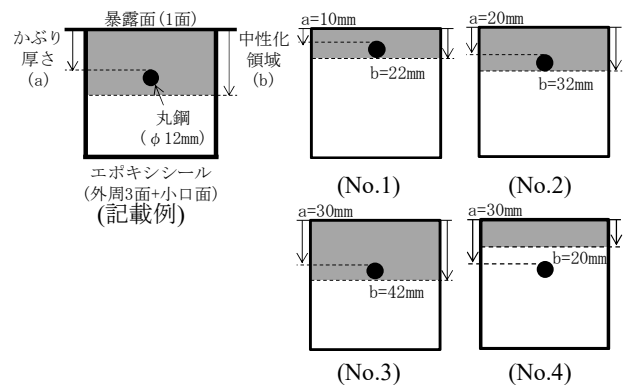


Fig. 2 かぶり厚さと中性化深さの設定値
Concrete Cover Thickness and Target Values
of Concrete Carbonation

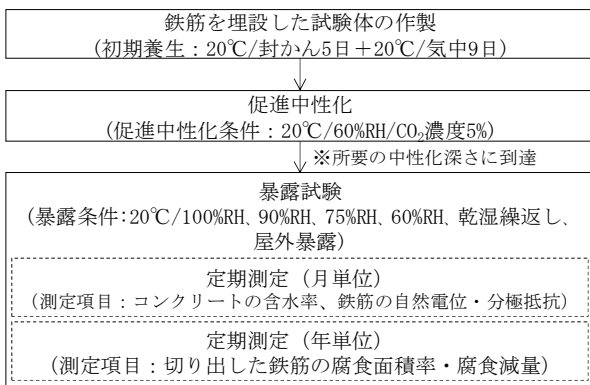


Fig. 1 実験の流れ
Experiment Flow Chart

Table 2 測定計画
Measurement Plan

試験体	測定項目	測定方法
有筋試験体	自然電位	JSCE-E 601
	分極抵抗	土木学会338委員会試案 ⁸⁾
	腐食面積率	JCI-SC1 ¹¹⁾
	腐食減量	JCI-SC1 ¹¹⁾
無筋試験体	中性化深さ	JIS A 1153
	含水率 (飽和度 [※])	JASS 5N T-602 (暴露面から12.5mm間隔で8等分)
	相対湿度 [※]	温湿度計による測定 ³⁾ (暴露面から10, 20, 30, 40mm)

※暴露試験での平衡状態の後に測定(経時測定なし)

鉄筋の真の分極抵抗へと変換した。分極抵抗の逆数と腐食電流密度には比例関係が認められるため¹⁰⁾、本研究では比例定数(K値)を0.026Vの一定値として、腐食電流密度を算定した。

また、概ね1年ごとに試験体端部から長さ100mmの鉄筋を切り出し、鉄筋の腐食面積率と腐食減量を測定した。腐食面積率および腐食減量の測定は、JCI-SC1¹¹⁾に準じて測定した。腐食減量の測定に用いた溶解剤は10%クエン酸二アンモニウム(20℃)とした。なお、本実験では黒皮付きの鉄筋を使用しており、健全な鉄筋の黒皮も併せて除去されるため、掛川らの報告¹²⁾を参考として黒皮の減量分を差し引いた腐食減量を算定した。なお、黒皮の減量分は、同一ロットの健全な黒皮付きの鉄筋を溶解剤に同時時間だけ浸漬して求めたが、鉄筋ごとに黒皮の厚みにばらつきがあるため、黒皮の減量分の補正により腐食減量が負の値となった場合は、腐食減量を0とした。

無筋試験体では、中性化深さ、含水率および相対湿度を測定した。中性化深さの測定は、JIS A 1153に準じて行った。含水率の測定は、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、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、JASS 5N T-602(コンクリートの乾燥単位容積質量促進試験方法)に準じて行った。コンクリートの内部湿度の測定は、野口らの報告³⁾を参考として、暴露面から10, 20, 30, 40mmの位置まで削孔し、ボタン電池型の静電容量式温湿度計の設置により相対湿度を測定した。

コンクリートの使用材料をTable 3、調合をTable 4に示す。セメント種別は、高炉セメントB種とした。水セメント比は60%、単位水量は182kg/m³とし、化学混和剤はAE減水剤を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

コンクリートのフレッシュ性状をTable 5に示す。コンクリートのスランプの目標値は18±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をTable 6に示す。暴露試験体と併せて作製したφ100×200mmの管理供試体の試験結果を示した。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、材齢5日で脱型し、脱型以降は20℃、60%RH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91日以降、促進中性化が終了した材齢(No.1, 4では155日, No.2 では291日, No.3では746日)まで圧縮強度はほとんど変化しておらず、促進中性化の期間が異なるものでも、コンクリートの圧縮強度は概ね同等であると考えられる。

3.2 促進中性化および暴露試験の日数

促進中性化および暴露試験の日数をTable 7に示す。所要の中性化深さに達するまでの促進中性化の日数は155

～746日、促進中性化後の暴露試験の日数は708～1295日となった。なお、本試験は促進中性化と暴露試験の合計の期間を一定にして実施しているため、促進中性化の日数が長いNo.3では、暴露試験の日数が短くなった。

3.3 含水率

暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの含水状態のうち、鉄筋位置の質量含水率をFig. 3(a)、鉄筋位置の飽和度をFig. 3(b)に示す。なお、飽和度は飽水状態の質量含水率に対する割合として、式(1)により定義した。

$$Wd = \frac{S - Sd}{Sw - Sd} \times 100 \quad (1)$$

ここに、Wd：飽和度(%), S：測定質量(g)

Sd：絶乾質量(g), Sw：飽和質量(g)

本実験では、試験装置の制約から促進中性化の環境を

Table 3 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	BB	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	青梅産砕石(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
混和剤	Ad	AE減水剤

Table 4 コンクリートの調合

Mix Proportion of Concrete							
セメント種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad (セメントX%)
			W	BB	S	G	
BB	60	49.5	182	303	871	906	0.6

Table 5 コンクリートのフレッシュ性状

Test Results of Fresh Concrete Properties				
セメント種別	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
BB	19.0	4.2	21	2291

Table 6 コンクリートの圧縮強度

Test Results of Concrete Compressive Strength						
セメント種別	圧縮強度(N/mm ²)					
	標準 28日	封かん 91日	(材齢5日脱型後)気中養生			
			91日	155日*	291日*	746日*
BB	30.5	41.4	28.2	29.0	28.6	28.5

※促進中性化期間が終了した時点の材齢

Table 7 促進中性化・暴露試験の日数

Accelerated Carbonation and Exposure Test Days					
試験体記号	かぶり厚さ (mm)	促進中性化			暴露試験
		目標値 (mm)	実測値 (mm)	試験期間 (日)	試験期間 (日)
No.1	10	22	22.4	155	1295
No.2	20	32	34.1	291	1157
No.3	30	42	44.2	746	708
No.4	30	20	22.4	155	1295

20°C, 60%RHの一定条件とした。そのため、中性化後の露試験のうち、暴露条件100, 90, 75%RHでは、促進中性化試験の期間に一度乾燥を受け、暴露試験の期間に再度水分が戻る挙動となる。著者らは、本実験条件の下で、暴露試験の開始から約40日後に断面内の含水率分布が概ね平衡状態となることを確認している⁷⁾。なお、平衡状態となるまでの約40日間は、Table 7に示した暴露試験の日数の1割に満たないため、暴露試験の開始直後から平衡状態となっていると仮定し、その間の暴露試験の日数の補正は行っていない。

暴露条件100%RHでは、鉄筋位置の質量含水率は4~5%、飽和度は70~80%となり、暴露面に近い位置で大きくなる傾向が見られた。一方、暴露条件90, 75, 60%RHでは、暴露面からの距離に関わらず、鉄筋位置の質量含水率は2~3%、飽和度は40~50%といずれも小さくなった。乾湿繰返し条件では、乾燥後の鉄筋位置の質量含水率は3.0~3.5%であった。湿潤後では、暴露面からの距離が16mmでは質量含水率が4.5%まで上昇したが、36mmでは3.2%であった。乾湿繰返し条件では、暴露面に近い表層側での含水率の変動が大きく、暴露面より30mm以深では、乾燥後と湿潤後の含水率がほぼ同じであることが確認された。屋外暴露の条件では、天候の変化などにより断面内の含水率分布が平衡状態とはならないため、測定を行った日の参考値となるが、鉄筋位置の質量含水率は3.0%程度、飽和度は63%程度であった。

暴露条件と暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの内部湿度をFig. 4に示す。いずれも鉄筋の中心位置の値をプロットした。暴露条件60~100%RHでは、かぶり厚さに関わらず、内部湿度は暴露環境と概ね等しく、相対湿度が±5%RHの範囲で平衡状態となった。暴露条件ごとの内部湿度は、屋外暴露の条件では概ね100%RHとなった。乾湿繰返し条件では、湿潤後は概ね100%RH、乾燥後は80~90%RH程度となった。

ここで、Fig. 4より暴露条件が100%RHでは、長期の暴露試験で平衡状態となり、コンクリートの内部湿度が暴露環境と同様の100%RHとなることが確認できる。一方、長期の暴露試験により、コンクリートの内部湿度が100%RHで平衡状態となった後も、Fig. 3より質量含水率は4%程度、飽和度は70%程度であり、コンクリート空隙中の残りの30%の部分は、水分で飽和していない状態で存在しているものと考えられる。

3.4 鉄筋の腐食状況

暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の自然電位の関係をFig. 5に示す。図の横軸には、本実験におけるコンクリートの飽和度と内部湿度の平均値の関係を併記した。また、図中には、ASTMの腐食判定基準¹³⁾も併せて示した。比較用に設定した中性化が鉄筋位置まで未到達の水準(図中の「30未達」)では、飽和度が大きくなるほど自然電位が小さくなる傾向があるが、概ね腐食なしと判定された。鉄筋位置まで中性化させた水準

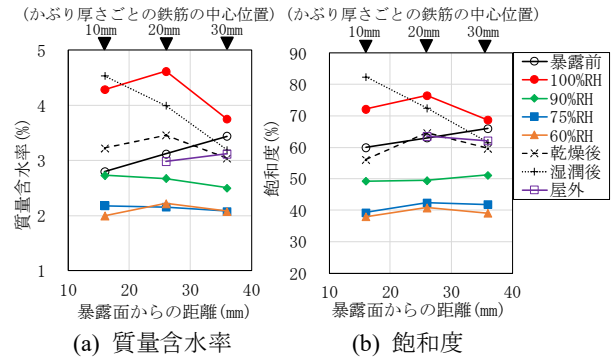


Fig. 3 暴露試験の平衡状態における鉄筋位置のコンクリートの含水状態

Water Condition of Concrete after Exposure Test

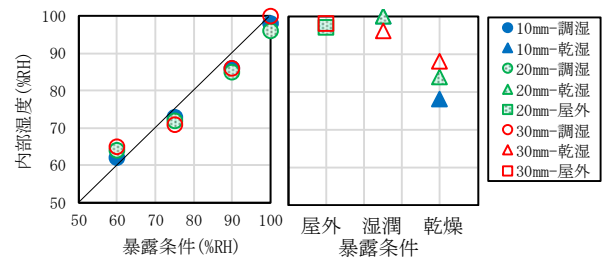


Fig. 4 暴露条件と暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの内部湿度

Relationship between Exposure Cases and Humidity of Concrete after Exposure Test

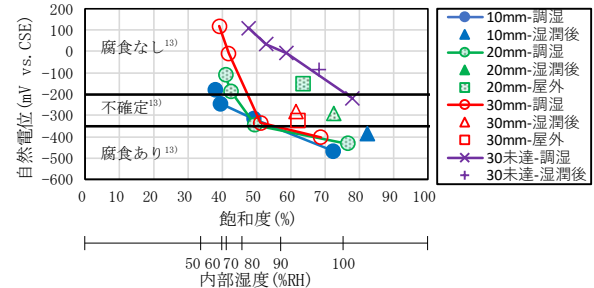


Fig. 5 暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の自然電位の関係

Relationship between Saturation of Concrete and Natural Potential of Rebar after Exposure Test

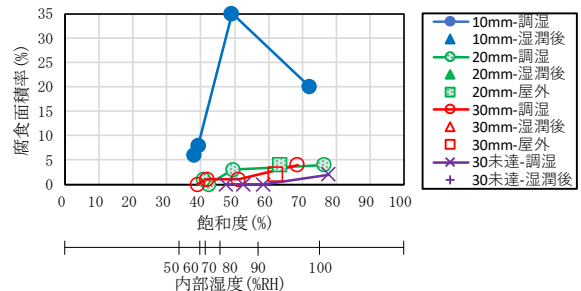


Fig. 6 暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の腐食面積率の関係

Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Area of Rebar after Exposure Test

で、暴露環境の相対湿度を変えた条件(図中の「調湿」)では、かぶり厚さに関わらずコンクリートの飽和度が50%、内部湿度が80%を上回ると腐食ありと判定された。一方、コンクリートの飽和度が50%を下回ると、かぶり厚さが小さいほど自然電位が小さくなり、かぶり厚さが10mmの場合は鉄筋腐食の可能性が不確定と判定された。乾湿繰り返しの湿潤後の条件(図中の「湿潤後」)では、かぶり厚さが10mmの場合は、飽和度が80%程度となり、腐食ありと判定された。かぶり厚さが20, 30mmの場合は、飽和度が60~70%程度となり不確定と判定された。屋外暴露の条件(図中の「屋外」)では、飽和度は60%程度となり、かぶり厚さが20mmの場合は腐食なし、かぶり厚さが30mmの場合は不確定と判定された。なお、屋外暴露の条件については、天候の変化などにより断面内の含水率分布は変化するが、過去の含水率の履歴が分からないため、明確な理由は考察できなかった。

暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と切り出した鉄筋の腐食面積率の関係をFig. 6に示す。比較用に設定した中性化が鉄筋位置まで未到達の水準では、飽和度に関わらず腐食面積率は2%以下となり、鉄筋腐食は生じていないものと判断された。鉄筋位置まで中性化させた水準で、暴露環境の相対湿度を変えた条件では、かぶり厚さが10mmの場合は、飽和度が50%、内部湿度が80%で腐食面積率が35%と大きくなり、その点を最大とした山なりの分布となった。かぶり厚さが20, 30mmの場合は、飽和度に関わらず腐食面積率は4%以下となり、鉄筋腐食は生じていないものと判断された。

暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と切り出した鉄筋の腐食減量の関係をFig. 7に示す。中性化による鉄筋腐食は塩害で見られるような孔食の形態にはならず、表面に一様に進行する傾向があるため、腐食減量と同等の割合で腐食面積率も増加する傾向にある。比較用に設定した中性化が鉄筋位置まで未到達の水準では、飽和度に関わらず、腐食減量は0.5mg/cm²/year以下と小さくなった。鉄筋位置まで中性化させた水準で、暴露環境の相対湿度を変えた条件では、かぶり厚さが10mmの場合は、腐食減量は最大で3.0mg/cm²/yearと大きくなった。かぶり厚さが20, 30mmの場合は、飽和度に関わらず腐食減量は1.5mg/cm²/year以下と小さくなった。なお、本実験の腐食減量は黒皮の減量分を差し引いた値であり、鉄筋ごとの黒皮の厚みのばらつきの影響を受けるため、腐食面積率の測定で腐食なしと判断されたものは、腐食減量は無視できる程度小さいものと考えられる。

3.5 鉄筋腐食速度

暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の腐食電流密度の関係をFig. 8に示す。図中には、RILEMの鉄筋腐食速度の判定基準¹⁴⁾を併せて示した。比較用に設定した中性化が鉄筋位置まで未到達の水準では、飽和度に関わらず不動態状態と判定された。鉄筋位置まで中性化させた水準で、暴露環境の相対湿度を変えた条

件では、かぶり厚さが10mmの場合は、飽和度が50%, 70%, 内部湿度がそれぞれ80%, 100%の時に、中～高程度の腐食速度、飽和度が50%を下回ると低い腐食速度と判定された。かぶり厚さが20mmの場合は、飽和度が50%を上回ると中～高程度の腐食速度、飽和度が50%を下回ると低い腐食速度と判定された。かぶり厚さが30mmの場合は、飽和度に関わらず低い腐食速度と判定された。

かぶり厚さが10mmの場合は、飽和度が50%の時に腐食面積率と腐食電流密度が最大となった。この理由を以下に考察する。コンクリートの飽和度が70%と高い場合には、鉄筋位置に水は豊富にあるが、腐食反応に必要な酸素が十分に供給されない状態であると考えられる。一方、コンクリートの飽和度が40%と低い場合には、鉄筋位置には十分な水が存在しないが、腐食反応に必要な酸素は十分に供給される状態であると考えられる。コンクリートの飽和度が50%の時には、鉄筋位置に水と酸素がともに一定量存在している状態であると考えられ、腐食電流密度が最大となったものと推察される。このように、中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食速度を適切に評価するためには、コンクリートの含水率だけではなく酸素濃度も考慮する必要がある、今後の課題と考えられる。

4. 現地調査

4.1 調査の概要

長期間供用されたRC造建築物の改修計画に伴い、躯体

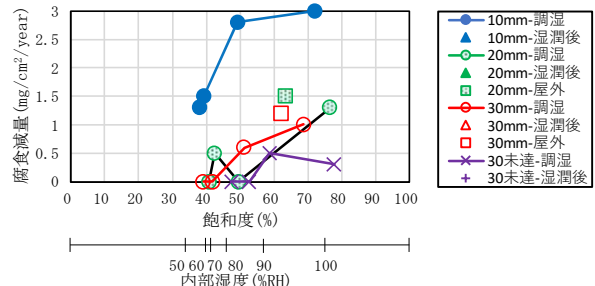


Fig. 7 暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の腐食減量の関係

Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Amount of Rebar after Exposure Test

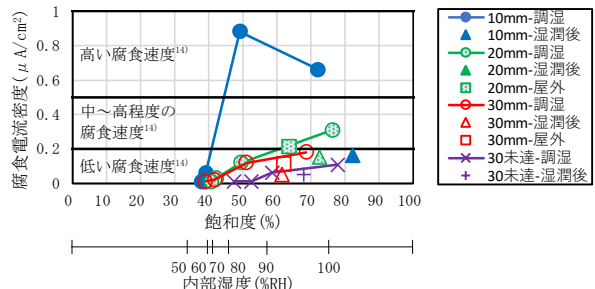


Fig. 8 暴露試験の平衡状態におけるコンクリートの飽和度と鉄筋の腐食電流密度の関係
Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Rate of Rebar after Exposure Test

の耐久性調査を行った。調査した建築物は、調査時点で建築後88年が経過した、京都府に位置する鉄筋コンクリート造の建築物である。

調査項目をTable 8に示す。質量含水率は、乾式コア供試体(φ100mm)を用いて測定した。採取したコア供試体は、表層より15mm間隔で乾式カッターを用いて切断し、各試験片を測定試料として表層からの含水率分布を測定した。なお、外壁ではコア採取ができなかったため、かぶりコンクリートのはつり片を用いて質量含水率を測定した。コンクリートの力学特性である圧縮強度、ヤング係数および単位体積質量は、湿式コア供試体(φ100mm)により測定した。採取したコア供試体は、高さが直径の2倍となるように両端を研磨して整形した。中性化深さは、湿式コア供試体の割裂面(一部の供試体では側面)を利用して、フェノールフタレインの呈色反応により測定した。鉄筋腐食状況は、コアを採取した近傍でかぶりコンクリートをはつり取り、鉄筋を露出させて目視により腐食グレードを評価した。腐食グレードは、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針¹⁵⁾を参考として、5段階にグレード分けした。自然電位と分極抵抗は、ポータブル型分極抵抗測定装置(交流インピーダンス法)を用いて測定した。なお、測定した分極抵抗は、先述した2.3節と同様の方法で腐食電流密度へと変換した。腐食面積率は、鉄筋の一部を切り出して測定した。

調査した部材の一覧をTable 9に示す。調査対象は、内壁5ヶ所、外壁2ヶ所、合計7ヶ所である。壁厚はいずれも120mm、表層の仕上げ種類は打放しもしくはモルタルと

漆喰の組合せであった。配筋条件はφ9mm丸鋼のシングル配筋であった。鉄筋のかぶり厚さは、20~90mmであり、測定位置によりばらつきが認められた。

4.2 調査結果

力学特性の測定位置には制約があり、内壁W5を代表箇所として測定した。内壁W5のコンクリートの圧縮強度は12.5N/mm²、ヤング係数は19.0kN/mm²、単位容積質量は2,275kg/m³であった。

RC造建築物の耐久性調査結果の一覧をTable 10に示す。中性化深さは、内壁ではW5を除いて壁厚の全断面、外壁ではかぶりコンクリートをはつり取った全範囲に到達していた。内壁W5において、鉄筋位置まで中性化が進行していなかった理由として、表層の仕上げモルタルにより中性化の進行が抑制されたものと推察される。

鉄筋位置におけるコンクリートの質量含水率は、内壁では0.7~1.2%、外壁では0.9%となった。調査時点におい

Table 8 調査項目
Survey Item

調査項目	調査試料
質量含水率(飽和度)	乾式コア供試体 (直径φ100mm)
圧縮強度、ヤング係数 単位容積質量、中性化深さ	湿式コア供試体 (直径φ100mm)
鉄筋腐食状況、自然電位 分極抵抗	かぶりコンクリートをはつり露出させた鉄筋
腐食面積率	切り出した鉄筋

Table 9 調査した部材の一覧
List of Surveyed Materials

記号	階	部材	部材厚 (mm)	手前側 室用途	手前側 仕上げ種類	奥側 室用途	奥側 仕上げ種類	鉄筋種別	かぶり厚さ (mm)
W1	B1	内壁	120	ホール	打放し	階段室	打放し	丸鋼φ10 (シングル 配筋)	25(手前)/85(奥)
W2			廊下	モルタル・漆喰	ホール	モルタル・漆喰	90(手前)/20(奥)		
W3	1F		120	居室	打放し	居室	打放し		90(手前)/20(奥)
W5			廊下	モルタル・塗装	階段室	モルタル・漆喰	45(手前)/65(奥)		
W6	3F		120	居室	打放し	廊下	モルタル・漆喰		50(手前)/60(奥)
W4	1F		外壁	120	廊下	モルタル・漆喰	屋外		モルタル・漆喰
W7	3F	120		廊下	モルタル・漆喰	屋外	モルタル・漆喰		50(屋内側)/-

Table 10 耐久性調査結果の一覧
List of Survey Results

記号	湿式コア	乾式コア		原位置(非破壊)		原位置(目視)	鉄筋切出し
	中性化深さ	質量含水率 (鉄筋位置)(%)	飽和度 (鉄筋位置)(%)	自然電位 (mV vs.CSE)	腐食電流密度 (μA/cm ²)	腐食グレード	腐食面積率 (%)
W1	全断面	1.2	16	-225	0.14	1	18
W2	全断面	0.7	9	-317	—※3	1	10
W3	全断面	0.7	10	-445	0.01	3	73
W5	23.9mm	1.1	14	+180	—※3	1	8
W6	全断面	1.0	10	+214	0.01	1	10
W4	鉄筋全断面※1	0.9※1	9※2	-186	—※3	1	8※4
W7	鉄筋全断面※1	0.9※1	9※2	-150	—※3	2	48※4

※1：かぶり部分のはつり片で測定した ※2：はつり片の飽水含水率は内壁における平均値と仮定した

※3：手前側の仕上げ種類が「モルタル・漆喰」の場合には、適切な値が得られなかった ※4：写真により測定した

て、いずれもコンクリートは鉄筋位置まで乾燥が進行していることが確認された。また、測定した質量含水率から、先述した3.3節と同様の方法で飽和度を算定した。鉄筋位置におけるコンクリートの飽和度は、内壁では9~16%、外壁では9%となり、調査時点において、いずれも鉄筋位置には腐食反応に必要とされる水がほとんど存在していない状況であることが確認された。

かぶりコンクリートをはつり取り、露出させた鉄筋の鉄筋腐食状況をPhoto 1に示す。内壁W1, W6では、腐食グレードは1であり、鉄筋は健全な状態であった。外壁W4は腐食グレード1であり、鉄筋は健全な状態であったが、はつり箇所の一部に豆板が認められ、そこでは腐食グレード3に相当する顕著な鉄筋腐食が認められた。豆板やひび割れなどの欠陥部では、腐食反応に必要とされる水と酸素が供給されやすくなるため、局所的な鉄筋腐食が引き起こされたものと考えられる。外壁W7は腐食グレード2であり、鉄筋腐食は認められたが腐食生成物は鉄筋の表面に留まる程度であった。

コンクリートの飽和度と鉄筋の自然電位の関係をFig. 9に示す。図中には、ASTMの腐食判定基準¹³⁾を併せて示す。調査時点での鉄筋位置のコンクリートの飽和度は20%以下と小さかったが、自然電位は測定位置によってばらつきが大きく、両者に明確な相関関係は認められなかった。なお、自然電位の測定結果から腐食ありと判定された内壁W3では、実際に鉄筋腐食が認められた。

コンクリートの飽和度と鉄筋の腐食電流密度の関係をFig. 10に示す。図には、RILEMの鉄筋腐食速度の判定基準¹⁴⁾を併せて示す。なお、腐食電流密度は表層の仕上げ種類が打放しの箇所のみでの測定となる。調査時点において、鉄筋位置のコンクリートの飽和度は20%以下と小さかったが、腐食電流密度の測定結果からはいずれも低い腐食速度と判定された。なお、先の実験結果では、コンクリートの飽和度が50%を下回ると、鉄筋腐食速度が小さくなる結果が得られている。長期間供用された建築物においても、コンクリートの飽和度が小さい部位では鉄筋腐食速度は小さくなっており、実験結果と同様の傾向が確認できた。

コンクリートの飽和度と鉄筋の腐食グレードの関係をFig. 11、鉄筋の腐食面積率との関係をFig. 12に示す。調査時点において、鉄筋位置のコンクリートの飽和度は20%以下と小さかったが、鉄筋の腐食グレードは1~3とばらつきがあり、両者に明確な相関関係は認められなかった。ただし、内壁W3を除いて腐食グレードは2以下であり、いずれの調査位置においても鉄筋腐食はほとんど生じていないものと判断できる。内壁W3では、腐食グレードは3、腐食面積率は73%となっており、鉄筋表面の大部分が腐食生成物で覆われた状態であった。長期の供用期間中に、鉄筋腐食を促進させる影響要因があった可能性が推察されるが、調査時点における鉄筋位置のコンクリートの飽和度は10%と乾燥状態であり、明確な理由は考察できなかった。

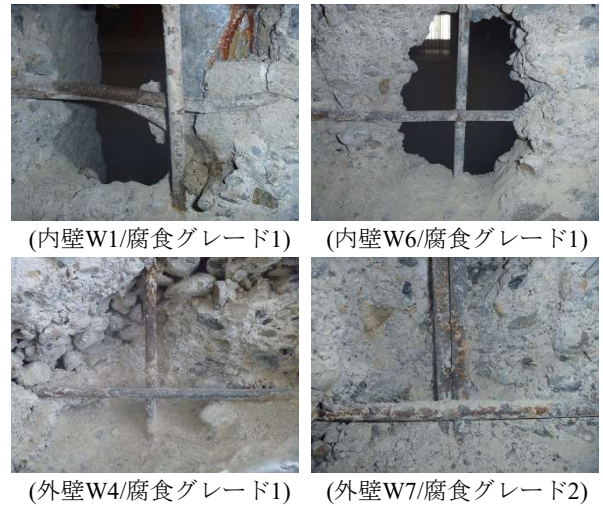


Photo 1 鉄筋腐食状況
Rebar Corrosion Status

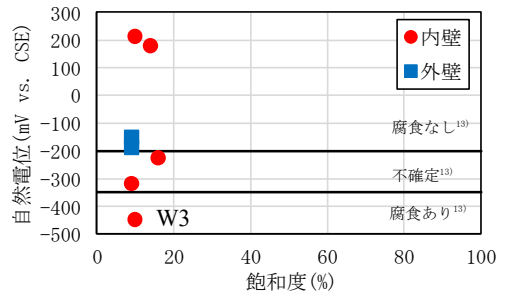


Fig. 9 コンクリートの飽和度と自然電位の関係
Relationship between Saturation of Concrete and Natural Potential of Rebar

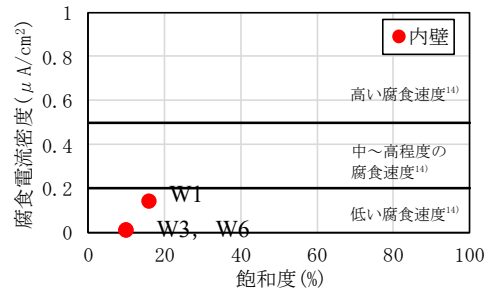


Fig. 10 コンクリートの飽和度と腐食電流密度の関係
Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Rate of Rebar

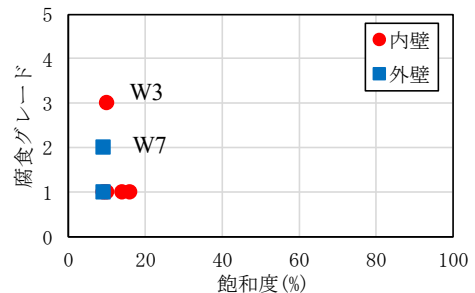


Fig. 11 コンクリートの飽和度と腐食グレードの関係
Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Grade of Rebar

以上より、長期間供用された建築物において、雨掛かりのない屋内の部材では供用期間中にコンクリートの乾燥が進行しており、一部の部材(内壁W3)を除いて中性化した部位でも鉄筋腐食はほとんど認められなかった。先の実験結果でも、コンクリートの飽和度が50%を下回ると、鉄筋腐食速度が小さくなる同様の結果が得られており、実験結果から得られたコンクリートの乾燥程度を考慮した中性化後の鉄筋腐食速度の評価が妥当であることを確認した。

5. まとめ

コンクリートが中性化した後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目指して、中性化後の鉄筋コンクリート試験体を異なる相対湿度に暴露して、鉄筋腐食速度を測定する実験を行った。その結果、次のことが分かった。

- 1) かぶり厚さが10mmの場合、飽和度が50%を下回ると低い腐食速度、飽和度が50%を上回ると高い腐食速度となった。
- 2) かぶり厚さが20, 30mmの場合は、飽和度が高いと中性化後の鉄筋腐食速度は増加するが、いずれも低い腐食速度となった。

現地調査として、建築後88年が経過したRC造建築物のコンクリートの含水率、中性化深さ、鉄筋腐食状況を測定した。その結果、次のことが分かった。

- 1) 中性化深さは、壁厚の全断面に到達していた。また、いずれの部材においても、長期間の供用でコンクリートの乾燥が進行しており、調査時点において、鉄筋位置には腐食反応に必要とされる水がほとんど存在していない状況であることが確認された。
- 2) 雨掛かりのない屋内の部材では、供用期間中にコンクリートの乾燥が進行したことにより、中性化した部位でも鉄筋腐食はほとんど認められなかった。このことから、先の実験結果から得られたコンクリートの乾燥程度を考慮した中性化後の鉄筋腐食速度の評価が妥当であることを確認した。

参考文献

- 1) 国土交通省：建築物ストック統計，2018.9
<https://www.mlit.go.jp/common/001254408.xlsx>
(参照 2020-01-23)
- 2) 国連持続可能な開発サミット：持続可能な開発のための2030アジェンダ，2015.9，
https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/
(参照 2020-01-23)
- 3) 野口貴文ほか：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査（その1～12），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 417-430，2015.9

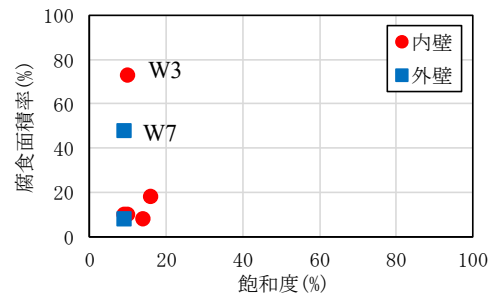


Fig. 12 コンクリートの飽和度と腐食面積率の関係
Relationship between Saturation of Concrete and Corrosion Area of Rebar

- 4) 日本建築学会：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，pp. 1-4，pp. 5-11，2017.8
- 5) 日本建築学会：JASS 5 大改定に向けて，2019年度日本建築学会大会（北陸）材料施工部門研究協議会資料，pp. 3-7，2019.8
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書（設計編），2017.3
- 7) 酒井正樹，神代泰道，小林利充：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，大林組技術研究所報，No. 82，pp. 1-8，2018.12
- 8) 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）報告書，pp. 253-255，2009.10
- 9) 金田尚志，松岡和巳：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
- 10) M. Stern and A. L. Geary: Electrochemical Polarization, I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, Journal of Electrochemical Society, Vol.104, No.1 pp.56-63, 1957
- 11) 日本コンクリート工学協会：JCI規準集（1977～2002年度），JCI-SC1 コンクリートの鋼材の腐食評価方法，pp. 91-94，2004.4
- 12) 掛川勝，榎田佳寛，松林裕二，鹿毛忠継：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす温度および中性化の影響に関する促進腐食実験，日本建築学会構造系論文集，Vol.77，No.682，pp.1809-1818，2012.12
- 13) ASTM C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009
- 14) 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
- 15) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針，p. 74，1991.7