

RC造建築物の乾燥状態と中性化・鉄筋腐食の進行に関する考察

酒井 正 樹 神代 泰 道
小林 利 充 植松 俊 幸

Study on the Relationship between Drying States of RC Buildings and Progress of Neutralization/Rebar Corrosion

Masaki Sakai Yasumichi Koushiro
Toshimitsu Kobayashi Toshiyuki Uematsu

Abstract

More sophisticated maintenance and life evaluation of RC (Reinforced Concrete) structures constructed in the period of high economic growth is becoming increasingly important. In the actual structures, the neutralization of concrete is accelerated by drying during the service period, whereas the corrosion of rebar did not occur in the past in situations where moisture content was low. Therefore, it is necessary to rationally evaluate the life of RC structures considering the rebar corrosion after concrete is neutralized. In this research, authors measured the degree of concrete drying and the corrosion rate of rebar for RC structures constructed 31 to 52 years ago. Results indicated that the corrosion rate of rebar is extremely slow when concrete is neutralized when drying occurs.

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生じない。そのため、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価を合理的に行う必要がある。本研究は、築31～52年が経過したRC造建築物の躯体調査において、非破壊検査技術や化学分析技術を用いてコンクリートの乾燥程度や鉄筋の腐食速度を測定した。その結果、乾燥を受ける部位(屋内環境など)ではコンクリートが中性化しても鉄筋腐食速度が極めて遅いことを定量的に示した。また、実際の建築物の置かれる環境条件を考慮して、使用期間の評価方法を検討した。

1. はじめに

近年、高度経済成長期以降に建設された鉄筋コンクリート造(以下、RC造という)建築物が築50年を超えはじめ、今後も使用を継続するか解体するかを判断を迫られている。前者の場合には、現状における実構造物の余寿命を正しく評価した上で、今後の適正な維持管理計画を策定する必要がある。しかしながら、構造体コンクリートは、供用期間中に温度や乾燥の影響を受けることで、標準養生の管理供試体とは異なる性状を示すため、建築物の仕様や環境によって、評価が変わることが課題であった。一例として、供用期間中に乾燥を受ける部位では、中性化の進行速度は大きくなる(例えば1)¹⁾、²⁾。一方、鉄筋腐食の反応に必要な水分がない場合は、鉄筋腐食は生じない。このように、コンクリートの含水状態に着目し、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価は合理的である。近年は、学協会でも注目され、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価に関する研究³⁾、⁴⁾も進められている。

コンクリートの含水率と鉄筋腐食の進行について、塩化物による鉄筋腐食に関しては、古賀ら⁵⁾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。

一方、中性化による鉄筋腐食に対しては、日本建築学会のRC造建築物の耐久設計小委員会をはじめ、既存のRC造建築物の躯体調査が数多く行われているものの、中性化後の含水率と鉄筋腐食の関係を定量的に論じた報告は少ない。

本報告は、長期間供用されたRC造建築物の躯体調査において、昨今発展が著しい非破壊検査技術や化学分析技術を活用して、コンクリートの乾燥程度や鉄筋の腐食速度を測定し、乾燥を受ける部位(屋内環境など)では、コンクリートが中性化しても鉄筋腐食速度が極めて遅いことを定量的に示すとともに、実際に建築物の置かれる環境条件を考慮することで、新たな使用期間の評価方法について検討したものである。

2. 調査概要

長期間供用されたRC造建築物の解体に伴い、躯体コンクリートの含水率と力学特性、中性化深さおよび鉄筋腐

食状況の調査を行った。調査対象とした4つの建物と既往文献の概要をTable 1に示す。建物A, BおよびDは東京都、建物Cは埼玉県に位置する築31～52年が経過した建築物である。建物C, Dの調査の詳細と一部データは著者らの既報(6, 7)を参照されたい。なお、既往文献(8)～(10)は、コンクリートの含水率と中性化深さおよび鉄筋腐食の状況が報告されている3つを選定した。

調査項目をTable 2に示す。乾式コア供試体による質量含水率、湿式コア供試体による圧縮強度およびヤング係数を測定した。コアの直径はφ73mmとし、供試体数は各2体とした。圧縮強度の測定に用いた供試体は、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。

質量含水率の測定に用いた供試体は、25mm間隔で乾式切断を行い、各試験片による含水率分布を測定した。中性化深さは、圧縮強度用の湿式コア供試体の割裂面(一部の供試体は側面)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。鉄筋の腐食状況は、コア採取した近傍でかぶりコンクリートをはつり、目視確認を行った。また、併せて電気化学特性(自然電位、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。測定端子の接触面はグラインダーによる研磨を行い、濡れウエスを貼り付けて、表面の質量含水率が4.5%以上となったことを確認してから測定を開始した。なお、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¹²⁾と鉄筋の真の分極抵抗の関係を用いて算出した。

建物Aの調査位置をFig. 1に示す。地下階では、地盤に接する地下外壁と屋内の柱および壁、地上階では、屋外に面する壁と屋内の柱、壁および床を調査の対象とした。なお、地下外壁、壁および床からは貫通コアを採取できたが、柱はSRCであったためコアを途中で折り取った。

建物Bの調査位置をFig. 2に示す。地盤に接する柱、梁および床と屋内の柱および壁を調査の対象とした。いずれも貫通コアは採取できなかったため、コアを途中で折り取った。建物A, Bの部材条件および仕上げ材の一覧をTable 3に示す。

Table 1 調査対象とした建物と既往文献の概要
The List of the Investigation Building and Papers

建物名称	竣工年(築年数)	所在地	建物用途	構造(階数)
建物A	1964(52)	東京都	事務所	SRC(-4～9)
建物B	1983(33)	東京都	事務所	SRC(-4～9)
建物C	1971(46)	埼玉県	事務所	RC(2)
建物D	1983(31)	東京都	研究所	RC(-1～2)
文献8	1929(84)～1971(43)	東京都	集合住宅 4物件 ほか	RC(4)～ SRC(14)
文献9	1929(84)	東京都	集合住宅	RC(4)
文献10	1958(55)	東京都	競技場	RC

Table 2 調査項目
Survey Component Item

項目	試験方法	測定対象
質量含水率	JASS 5N T-602に準拠	乾式コア供試体(直径φ73mm)
圧縮強度	JIS A 1108	湿式コア供試体(直径φ73mm)
ヤング係数	JIS A 1149	
単位体積質量	JIS A 1108	
中性化深さ	JIS A 1152	躯体コンクリートのはつり
鉄筋腐食状況	目視観察	
自然電位	JSCE-E 601	
分極抵抗	土木学会試案 ¹¹⁾	

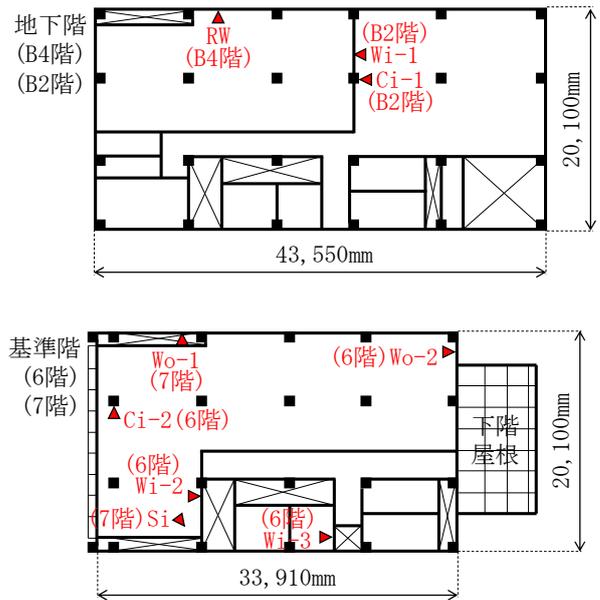


Fig. 1 建物Aの調査位置(地下階・地上階平面図)
Survey Position of Building A
(The floors under or above the ground)

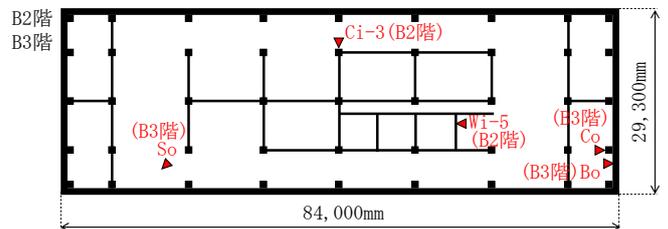


Fig. 2 建物Bの調査位置(地下階平面図)
Survey Position of Building B
(The floors under the ground)

3. 調査結果および考察

3.1 地下外壁(建物A)

建物Aでは、GL-16.1mの地下外壁から貫通コアを採取し、含水率、中性化深さおよび鉄筋腐食状況を調査した。地下外壁の調査位置をFig. 3に示す。調査位置は、

近年の地盤調査結果¹³⁾では、地下水位以下となっている。

地下外壁の部材断面内の含水率分布をFig. 4に示す。屋内側は貯水ピットのため含水率は約6%、地盤側は地下水位以下のため約8%となり、断面を通して含水率は高い値となった。

中性化深さおよび鉄筋腐食状況をPhoto 1に示す。屋内側、地盤側ともに中性化の進行は認められなかった。建築物の地下構造躯体(地中環境)では、常時水が作用するような湿潤環境に置かれるため、中性化の進行が極めて遅くなることが報告¹⁴⁾されており、本調査においても同様の結果が得られた。また、屋内側のかぶり厚さは50mm程度、地盤側では90mm程度であったが、中性化が進行していなかったこともあり、いずれも鉄筋腐食は認められず健全であった。

3.2 地上躯体(建物A~D)

3.2.1 含水率および力学特性 建物Aの地上躯体の部材断面内の含水率分布をFig. 5に示す。屋内壁(Wi)では、仕上げがある側の表面含水率が2~3%、仕上げがない側の表面含水率は1%程度となった。屋内柱(Ci)では、仕上げがある側の表面含水率が2.5%程度、表層より100mmを超えた位置の含水率は3%程度となった。屋内床(Si)では、仕上げがある上面の含水率が約2.5%、仕上げがない下面の含水率は約1%となった。外周壁(Wo)では、屋内側の表面含水率が1.5~3%、屋外側の表面含水率は約4%となった。

建物Bの部材断面内の含水率分布をFig. 6に示す。屋内柱(Ci)では、仕上げがない側の表面含水率が約2%、表層より180mmの位置の含水率は4.5%となった。屋内壁(Wi)では、仕上げがない両側の表面含水率が約1%、中心部の含水率は約2%となった。外周柱(Co)では、表層より120

Table 3 建物 A, B の部材条件および仕上げ材の一覧
Table of Specifications of Building Members and Finish Materials

物件	部材	記号	部材厚	仕上げ種類	
				屋内側	地盤側
建物 A	擁壁	RW	1000	なし	なし
	屋内壁	Wi-1	200	モルタル	モルタル
	屋内柱	Ci-1	900	モルタル	モルタル
	屋内壁	Wi-2	360	ボード	なし
	屋内壁	Wi-3	160	モルタル+タイル	なし
	屋内柱	Ci-2	160	モルタル+クロス	モルタル+クロス
	屋内床	Si	120	P タイル	なし
	外周壁	Wo-1	180	屋内側:なし	屋外側:モルタル+タイル
建物 B	外周壁	Wo-2	160	屋内側:モルタル	屋外側:モルタル+タイル
	屋内柱	Ci-3	900	なし	なし
	屋内壁	Wi-5	180	なし	なし
	外周柱	Co	900	屋内側:なし	地盤側:なし
	基礎梁	Bo	500	屋内側:なし	地盤側:なし
	土間床	So	200	屋内側:なし	地盤側:なし

mmの位置まで、含水率は約2.5%と概ね一定であった。基礎梁(Bo)では、仕上げがない側の表面含水率が2.5%、表層より100mmの位置の含水率は3.5%となった。下部地盤に接する土間床(So)では、上面より115mmの位置まで、含水率は約4.5%と概ね一定であった。

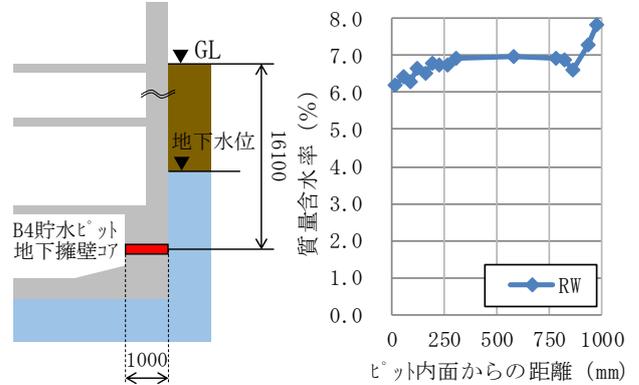


Fig. 3 地下外壁の位置
Survey Position of Outer Wall under the Ground

Fig. 4 地下外壁の含水率分布
Water Content Distribution of Outer Wall under the Ground

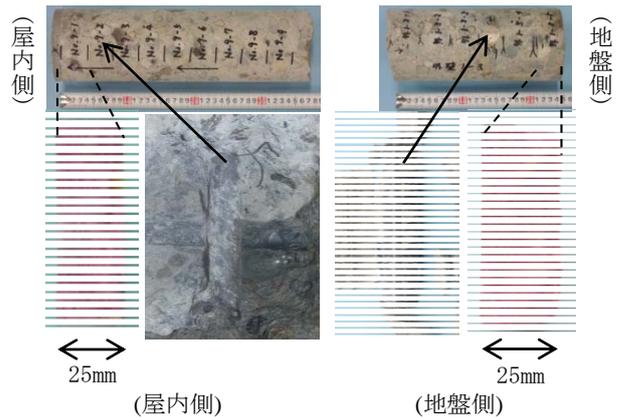


Photo 1 地下外壁の中性化深さおよび鉄筋腐食状況
Neutralization Depth and Rebar Corrosion of Outer Wall under the Ground

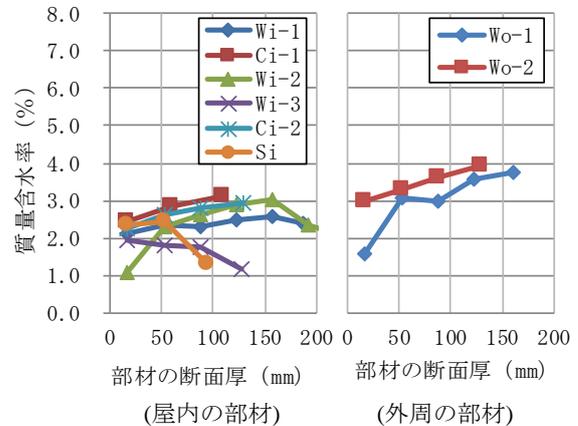


Fig. 5 建物 A の部材断面内の含水率分布
Water Content Distribution of Building A Members

質量含水率と圧縮強度の関係をFig. 7に示す。凡例のうち、コンクリート打放し仕上げのものは黒塗、モルタル塗りやタイル張りなど、何らかの仕上げが施されているものは白塗で示した。建物により設計基準強度が異なるため、絶対値による比較はできない。建物AおよびDでは、質量含水率が大きい方が圧縮強度は大きくなる傾向が認められた。この理由として、乾燥を受けにくい屋外側の壁、柱および梁の中心部などの含水率が高くなる部位では、長期にわたって水和反応が継続し、圧縮強度が増進したものと推察される。一方、建物BおよびCでは、値のばらつきが大きく明確な傾向は認められなかった。

質量含水率とヤング係数の関係を Fig. 8 に示す。圧縮強度と同様に、建物 A および D では、質量含水率が大きい方がヤング係数は大きくなる傾向が認められた。乾燥によりヤング係数が低下する現象については、既往の文献^{例え ば 15)}にも報告があるため、本調査においても同様の傾向となったと考えられる。一方、建物 B および C では、値のばらつきが大きく明確な傾向は認められなかった。

3.2.2 中性化進行状況 圧縮強度と中性化速度係数の関係をFig. 9に示す。仕上げなしでは、JASS 5 (2015)¹⁶⁾に示されている両者の関係を併せて示した。仕上げなしでは、圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなる傾向が認められた。しかしながら、屋外側(凡例白抜)の地中に接する部位を除くと、中性化速度係数はJASS 5の関係式よりも2~4倍大きくなった。この理由として、供用期間中に受ける乾燥の影響により、CO₂が侵入しやすくなったことが考えられる。

仕上げありでは、一部を除いて中性化速度係数は概ね0 mm/√年となり、圧縮強度に関わらず、仕上げ材により中性化の進行が抑制されることが確認できた。

質量含水率と中性化速度係数の関係をFig. 10に示す。仕上げなしでは、含水率が3~4%を下回ると、中性化速度係数が急激に大きくなった。一方、質量含水率が5%以上では、中性化速度係数は概ね0 mm/√年となった。

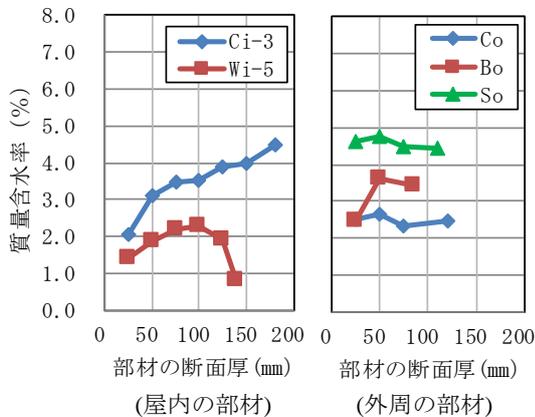


Fig. 6 建物Bの部材断面内の含水率分布
Water distribution of building B members

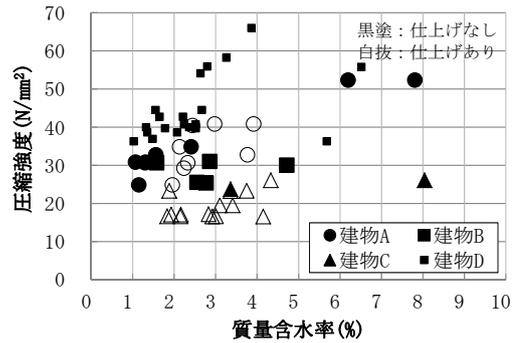


Fig. 7 質量含水率と圧縮強度の関係
Relationship between Water Content and Compressive Strength

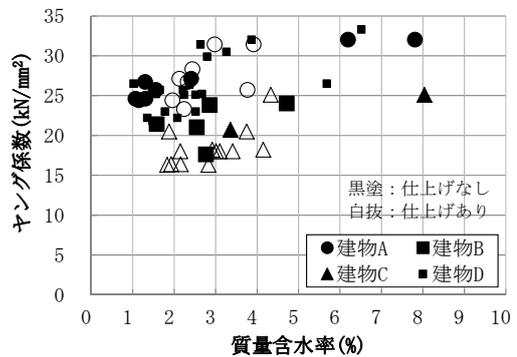


Fig. 8 質量含水率とヤング係数の関係
Relationship between Elastic Modulus and Compressive Strength

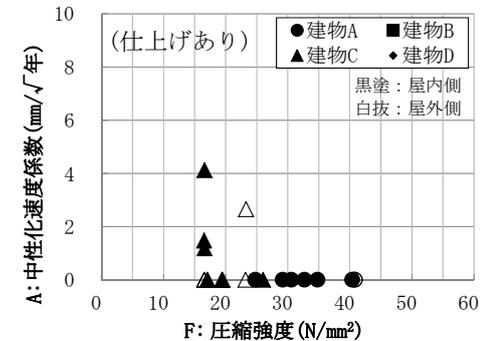
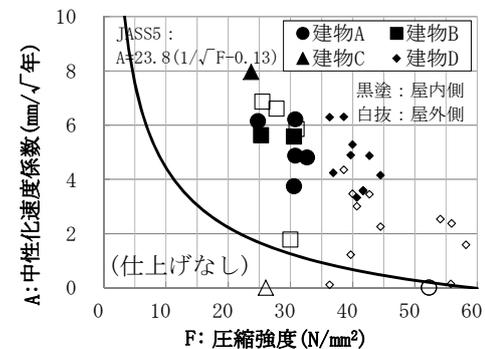


Fig. 9 圧縮強度と中性化速度係数の関係
Relationship between Neutralization Depth and Compressive Strength

図中には、全データの指数関数による近似式を併せて示した。近似式の寄与率は0.81となり、比較的高い相関関係が認められた。しかしながら、質量含水率が1~2%の範囲では、建物Aの中性化速度係数が4~6mm/√年となり、近似式よりも小さくなった。また、質量含水率が2~4%の範囲では、建物B、Cの中性化速度係数が4~8mm/√年となり、近似式よりも大きくなった。これらの誤差が生じる理由として、先に示した圧縮強度の違いが考えられ、含水率の低下に伴って中性化速度係数が増大する傾きが異なるものと推察された。そこで、中性化速度係数を目的変数、圧縮強度と質量含水率を説明変数として多変量解析を行い、それぞれに対する影響を検討した。なお、圧縮強度については、長谷川らの報告¹⁷⁾を参考として平方根の逆数、質量含水率については、申¹⁸⁾らの報告を参考として自然対数に比例すると仮定した。得られた関係を式(1)に示す。

$$A = 15.4 (1/\sqrt{F}) - 3.23 \text{Ln}(W) + 3.88 \quad (1)$$

A : 中性化速度係数(mm/√年)
 F : 部材の圧縮強度(N/mm²)
 W : かぶり部分の質量含水率(%)

圧縮強度を20N/mm²と60N/mm²とした場合の式(1)の関係を、Fig. 10に併せて示す。式(1)の決定係数は0.61となり若干低い相関となった。建物Bおよび建物Cでは、質量含水率が2~4%の範囲で、中性化速度係数の実測値が解析結果よりも大きい側に外れた。この理由として、今回の解析でパラメータとしなかった空間のCO₂濃度が高かった可能性が推察された。一方、建物Aでは、質量含水率が1~2%の範囲で、中性化速度係数の実測値が小さい側に外れた。この理由として、今回の解析では測定時の質量含水率を変数としたが、過去に含水率の履歴が高い状態で推移していた可能性が推察された。

本検討においては、分析したデータ数も限られており、これ以上の確度の検証はできないため、今後も含水率を含めたデータを拡充し、近似式の精度向上に努めたい。

仕上げありでは、仕上げなしの場合と比較して、中性化速度係数は小さくなった。質量含水率と中性化速度係数には、明確な相関関係は認められず、仕上げ材による中性化の進行抑制効果が大きいものと考えられた。

3.2.3 鉄筋腐食状況 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と鉄筋の腐食グレードの関係をFig. 11に示す。目視による腐食グレードは、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¹⁹⁾を参考として、5段階(1:鉄筋腐食が認められない, 2:部分的に点錆が認められる, 3:鉄筋表面に錆が連続して認められる, 4:腐食により鉄筋の一部が断面欠損している, 5:腐食により鉄筋の全面が断面欠損している)にグレード分けした。

鉄筋位置まで中性化した部位の鉄筋の腐食グレードは3以下であった。古賀⁹⁾は、塩化物による鉄筋腐食につ

いて、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が生じないと報告している。しかしながら、本調査では、含水率が高いと中性化の進行自体が遅くなることもあり、鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率は最大でも3%程度であった。

一方、質量含水率が1%以下であっても、一部の部位では鉄筋の腐食グレードが2もしくは3と大きくなった。測定時点における含水率が低い場合でも、過去に含水率が高い時期があった場合、もしくは、鉄筋位置まで中性化が進行した後の期間が長い場合には、腐食グレードが3

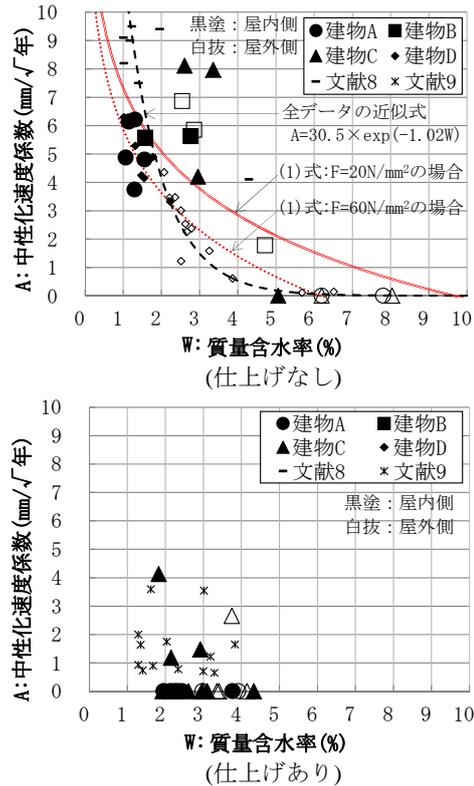


Fig. 10 質量含水率と中性化速度係数の関係
 Relationship between Water Content and Neutralization Depth

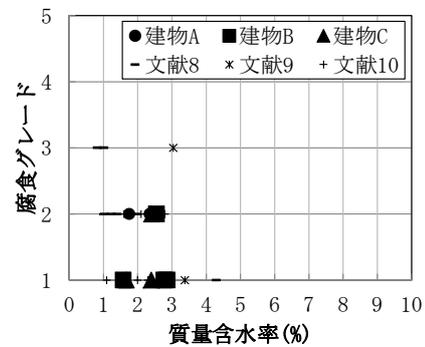


Fig. 11 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と鉄筋の腐食グレードの関係
 Relationship between Water Content and the Grade of Bar Corrosion at Neutralization Area

程度まで大きくなる可能性が推察された。そこで、質量含水率と鉄筋位置まで中性化した後の経過年数の積を算出し、鉄筋の腐食グレードとの関係を検討した。なお、中性化後の経過年数は中性化の進行予測に用いられる \sqrt{t} 則をそのまま用いた。両者の関係を Fig. 12 に示す。腐食グレードが3以下の範囲に限られるものの、両者の積と腐食グレードには概ね正の相関関係が認められた。このことから、劣化要因を中性化とした場合には、鉄筋位置まで中性化が進行すると、含水率が低くても鉄筋腐食が進行する可能性があるが、鉄筋腐食の進行速度は中性化の進行予測に用いられる \sqrt{t} 則を準用して表せる程度の緩やかなものであり、長期経過後における腐食グレードも高くないものと推察される。ただし、本調査では過去の含水率の履歴が分からなかったため、関係データの拡充を含めて、論理の検証は今後の課題としたい。

3.2.4 電気化学特性 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と自然電位の関係を Fig. 13 に示す。図中には、ASTMに示される腐食判定基準²⁰⁾を併せて示した。本調査では、腐食グレード2もしくは3の一部で腐食遷移域と判定され、微破壊による電気化学的手法により既存構造物の鉄筋腐食状況を評価できる可能性を確認した。

鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と腐食電流密度の関係を Fig. 14 に示す。腐食電流密度は分極抵抗の逆数により求められ鉄筋腐食速度と相関のある値である。なお、図中には RIREM に示される腐食判定基準²¹⁾を併せて示した。本調査では、腐食グレード2もしくは3の場合でも、腐食電流密度は $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下となり、鉄筋腐食速度は小さく評価された。この理由として、測定部位の含水率が最大でも3%程度と小さく、鉄筋腐食を促進させる環境条件ではなかったことから、実際に他建築物の置かれる環境条件を考慮することで、使用期間を合理的に評価できるものと考えられた。

4. まとめ

築31～52年が経過したRC造建築物の躯体調査結果に基づき、コンクリートの含水率と力学特性、中性化深さおよび鉄筋腐食状況の関係を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 常時水が作用するような湿潤環境に置かれる地下擁壁では、中性化はほとんど進行しない。
- 2) 仕上げがない場合には、含水率が3～4%を下回ると、中性化速度係数が急激に大きくなる。
- 3) 仕上げがない場合の中性化速度について、圧縮強度と質量含水率による予測式を提案した。
- 4) 鉄筋位置まで中性化が進行しても、含水率が低ければ鉄筋の腐食グレードは低い。
- 5) 質量含水率が低く、鉄筋の腐食グレードが3以下の範囲では、質量含水率と中性化後の経過年数の積と腐食グレードに概ね正の相関が認められた。

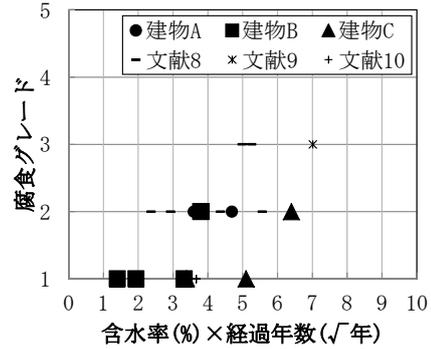


Fig. 12 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と中性化後の経過年数の積と鉄筋の腐食グレードの関係
Relationship between Product of Water Content and Passed Years, and Grade of Bar Corrosion at Neutralization Area

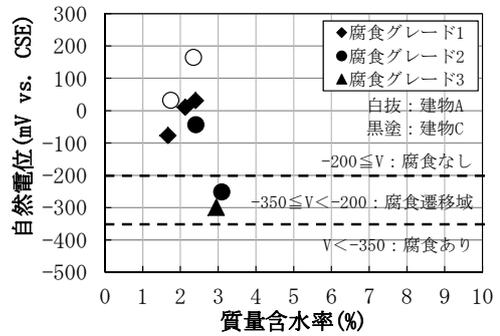


Fig. 13 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と自然電位の関係
Relationship between Water Content and Natural Electric Potential at Neutralization Area

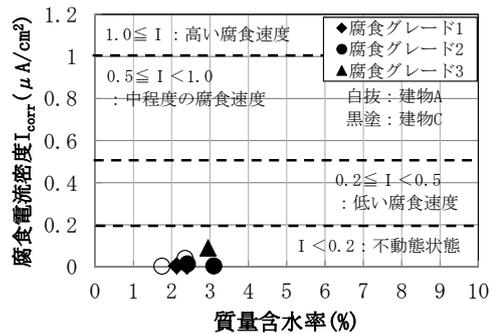


Fig. 14 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と腐食電流密度の関係
Relationship between Water Content and Corrosion Current Density at Neutralization Area

謝辞

分極抵抗の算定にあたり、BEMによる電流分布シミュレーションについて、日鉄住金テクノロジー株式会社の金田尚志氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 近藤連一訳：コンクリートの炭酸化－鉄筋の防食に対する影響と作用－，セメントコンクリート，No. 314，pp. 33-37，1973.4
- 2) 古賀一八，吉岡昌洋，長谷川直司：同潤会アパートの施工技術に関する調査研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 939-944，2004.7
- 3) 山本佳城，榊田佳寛，中村成春：塩化物を混入したコンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第568号，pp. 27-33，2003.6
- 4) 米澤敏男，押田文雄，本間大輔，山口善弘，岡本博史，中尾正純：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
- 5) 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
- 6) 酒井正樹，神代泰道，小林利充，植松俊幸：長期間供用したRC造建築物の含水状態と耐久性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，vol. 38，No. 1，pp. 801-806，2016.7
- 7) 植松俊幸，神代泰道，一瀬賢一：31年間供用した躯体コンクリートの品質に関する調査，日本建築学会技術報告集，第21巻，No. 48，pp. 409-414，2015.6
- 8) 木野瀬徹，今本啓一，田沼毅彦，清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後における鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 37，No. 1，pp. 601-606，2015.7
- 9) 野口貴文ほか：同潤会上野下アパートに関する調査研究（その1～8），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1127-1142，2014.9
- 10) 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. 417-440，2015.9
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 中山雄貴，花村昌哉：東京駅周辺の地下水位回復状況，全地連「技術フォーラム2013」長野，講演概要集，2013
- 14) 本名英理香，氏原菜摘，伊代田岳史，濱崎仁：地中環境におけるコンクリートの中性化進行抑制効果の検討，第69回セメント技術大会，pp. 218-219，2015.5
- 15) 堀口直也，五十嵐豪，丸山一平：セメント硬化体のヤング率及びポアソン比の相対湿度依存性，日本建築学会構造系論文集，Vol. 76，No. 660，pp. 231-236，2011.2
- 16) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2015.7
- 17) 長谷川拓哉，千歩修：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，vol. 28，No. 1，pp. 665-670，2006.7
- 18) 申雪寒，長谷川寿夫：コンクリートの乾燥程度を考慮した外断熱建物躯体の中性化速度予測式の提案，コンクリート工学年次論文集，vol. 27，No. 1，pp. 625-630，2005.7
- 19) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説(1991)，pp. 74，1991.7
- 20) ASTM-C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete，2009
- 21) 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, 2004.11