

論文 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

酒井 正樹^{*1}・神代 泰道^{*2}・小林 利充^{*2}・植松 俊幸^{*1}

要旨：築 31～84 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。その結果、次のことがわかった。(1) 常時水が作用す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検討した。(3) 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。(4) 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鉄筋の腐食グレードに概ね正の相関が認められる。

キーワード：躯体調査, 含水率, 中性化, 鉄筋腐食, 自然電位, 分極抵抗

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により、中性化の進行速度が大きくなる^{たとえ1)}場合がある。一方、中性化が進行しても、乾燥により含水率が低くなった部位では、鉄筋腐食は生じないとの報告²⁾もあり、近年では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、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 1.2kg/m^3 を超える塩化物イオンを含有したのもでも、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、コンクリートの含水率が高いと中性化の進行自体が遅くなる¹⁾ため、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詳細を表-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 31～84 年が経過した建築物である。なお、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状況が報告されている 3 つを選定した。

調査項目を表-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 $\phi 73\text{mm}$ 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。

表-1 調査対象とした建物と既往文献の詳細

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 4 物件	集合住宅 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

表-2 調査項目

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 $\phi 73\text{mm}$)
圧縮強度	JIS A 1108	湿式コア供試体 (直径 $\phi 73\text{mm}$)
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	
鉄筋腐食状況	目視観察	躯体コンクリートの はつり
自然電位	JSCE-E 601	
分極抵抗	土木学会試案 ¹¹⁾	

*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)

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 の交流電圧を印可して、10～0.01Hz 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、濡れウェスを貼り付けて、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た装置の測定値と鉄筋の真の分極抵抗の関係を用いて算出した。

建物 A の調査位置を図-1 に示す。地下階では、地盤に接する地下擁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，地下擁壁，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 の調査位置を図-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表-3 に示す。

3. 調査結果および考察

3. 1. 地下擁壁（建物 A）

建物 A では、GL-16.1m の地下擁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。地下擁壁の調査位置を図-3 に示す。調査位置は，近年の地盤調査結果¹²⁾では，地下水位以下となっている。

部材断面内の含水率分布を図-4 に示す。屋内側は貯水ピットのため含水率は6%程度，地盤側では地下水位

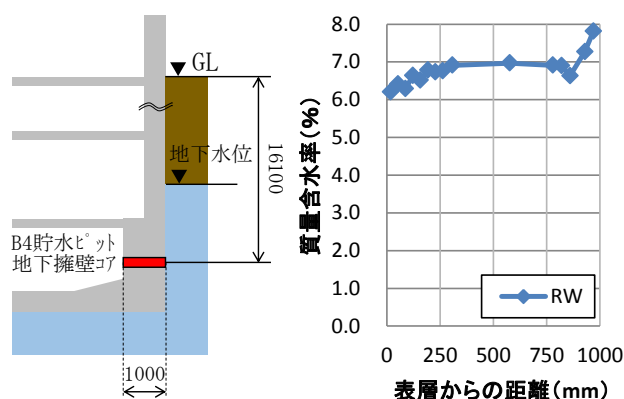


図-3 地下擁壁の調査位置 図-4 地下擁壁の含水率分布

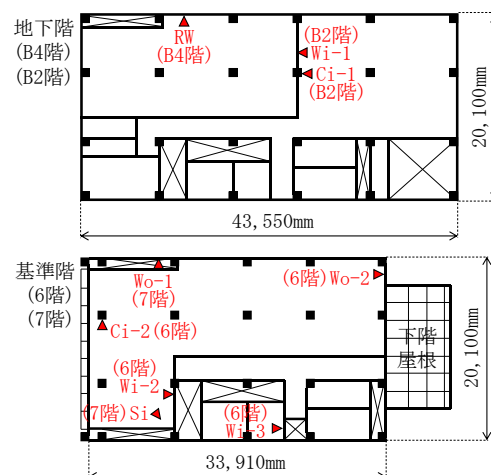


図-1 建物 A の調査位置（地下階・地上階平面図）

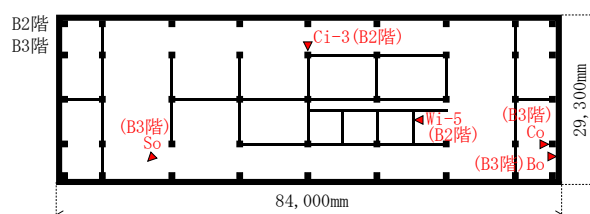


図-2 建物 B の調査位置（地下階平面図）

表-3 建物 A，B の部材条件および仕上げ材の一覧

	部材	記号	部材厚	内部仕上	外部仕上
物件 A	擁壁	RW	1000	なし	なし(地盤)
	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
	屋外壁	Wo-1	180	なし	モルタル+タイル
物件 B	屋外壁	Wo-2	160	モルタル	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
	屋外柱	Co	900	なし	なし(地盤)
	屋外梁	Bo	500	なし	なし(地盤)
	屋外床	So	200	なし	なし(地盤)

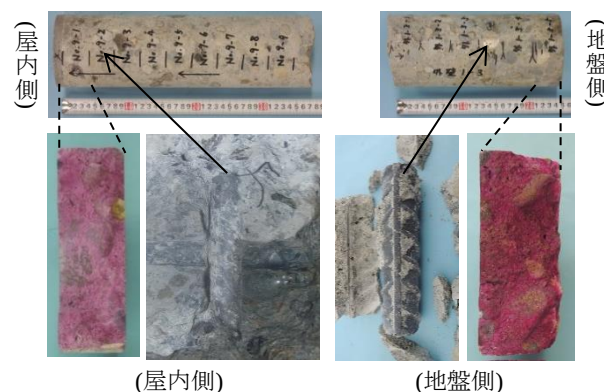


写真-1 地下擁壁の中性化深さおよび鉄筋腐食状況

以下のため 8%程度となり、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写真-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¹³⁾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なかった。

3. 2. 地上躯体（建物 A～D）

（1）含水率および力学特性

建物 A の部材断面内の含水率分布を図-5 に示す。屋内壁(Wi)では、仕上げがある表面の含水率が 2～3%，仕上げがない場合では 1%程度の含水率勾配となった。屋内柱(Ci)では、仕上げがある表面の含水率が 2.5%程度、表層より 100mm を超えた位置では 3%程度の含水率勾配となった。屋内床(Si)では、仕上げがある上面の含水率が 2.5%程度、仕上げがない下面では 1%程度の含水率勾配となった。屋外壁(Wo)では、屋内側の表面の含水率が 1.5～3%，屋外側では 4%程度の含水率勾配となった。

建物 B の部材断面内の含水率分布を図-6 に示す。屋内柱(Ci)では、仕上げがない表面の含水率が 2%程度、表層より 180mm の位置では 4.5%の含水率勾配となった。屋内壁(Wi)では、仕上げがない両側表面の含水率が 1%程度、中心部では 2%程度の含水率勾配となった。外周柱(Co)では、表層より 120mm の位置まで、含水率は 2.5%程度と概ね一定であった。外周梁(Bo)では、仕上げがない表面の含水率が 2.5%，表層より 100mm の位置では 3.5%の含水率勾配となった。下部地盤に接する床(So)では、表層より 115mm の位置まで、含水率は 4.5%程度と概ね一定であった。

質量含水率と圧縮強度の関係を図-7 に示す。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ものの、建物 A および D では、質量含水率と圧縮強度には概ね正の相関関係が認められた。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たためと考えられる。一方、建物 B および C では、質量含水率と圧縮強度には、明確な相関関係は認められなかった。

質量含水率とヤング係数の関係を図-8 に示す。いずれにおいても、質量含水率とヤング係数には概ね正の相関関係が認められた。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^{たとえ14)}にも報告があり、本調査においても同様の傾向が得られた。

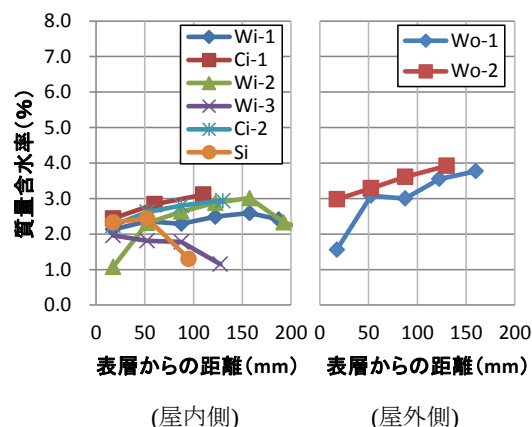


図-5 建物 A の部材断面内の含水率分布

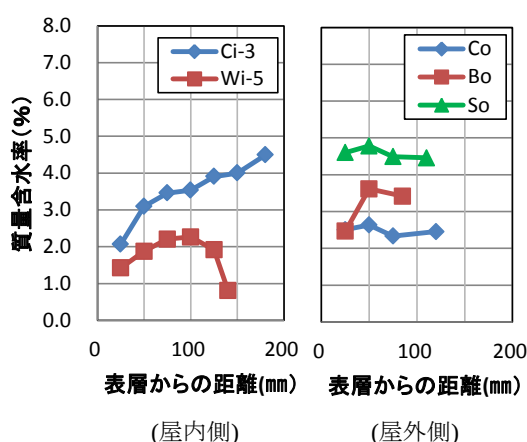


図-6 建物 B の部材断面内の含水率分布

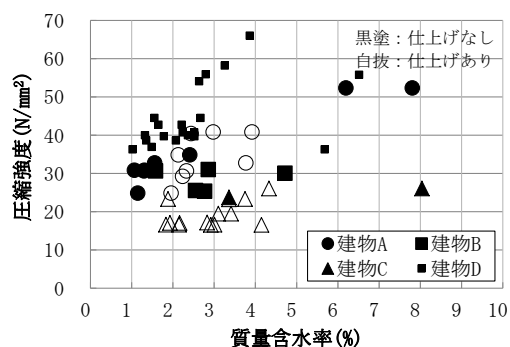


図-7 質量含水率と圧縮強度の関係

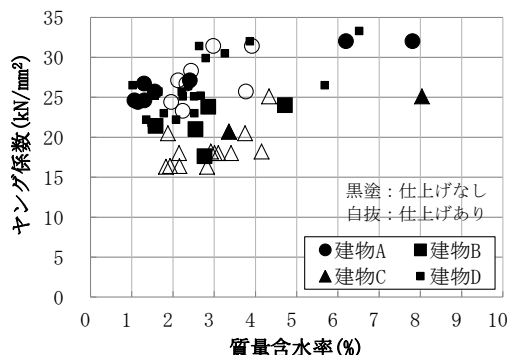


図-8 質量含水率とヤング係数の関係

(2) 中性化進行状況

圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-9に示す。仕上げなしでは、JASS 5 (2015)¹⁵⁾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された。

質量含水率と中性化速度係数の関係を図-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。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。近似式の決定係数は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4~6 mm/√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4~8 mm/√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¹⁶⁾を参考として平方根の逆数、質量含水率については、申¹⁷⁾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。

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

ここに、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、図-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。この理由として、建物により環境中のCO₂濃度や過去の含水率の履歴が異なる可能性が考えられる。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関係データの拡充が望まれる。

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。

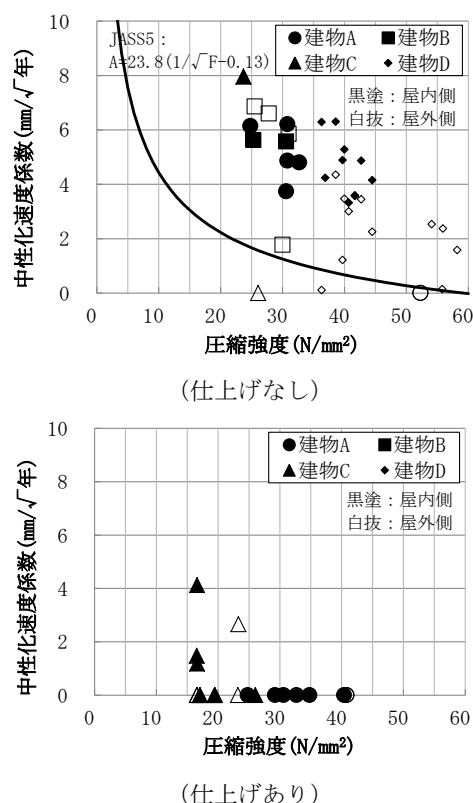


図-9 圧縮強度と中性化速度係数の関係

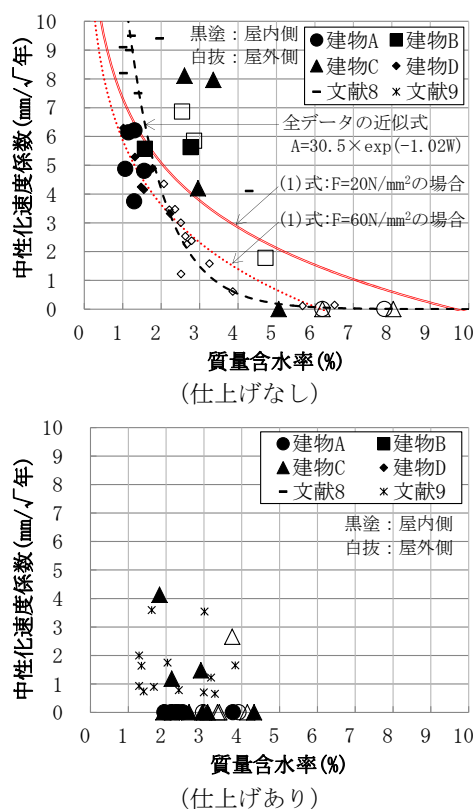


図-10 質量含水率と中性化速度係数の関係

(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図-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¹⁸⁾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。古賀ら⁵⁾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。そのため、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いう、同様の傾向を確認するに留まった。

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。両者の関係を図-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場合があるが、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ら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。

(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図-13に示す。図中には、ASTMに示される腐食判定基準¹⁹⁾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図-14に示す。腐食電流密度は分極抵抗の

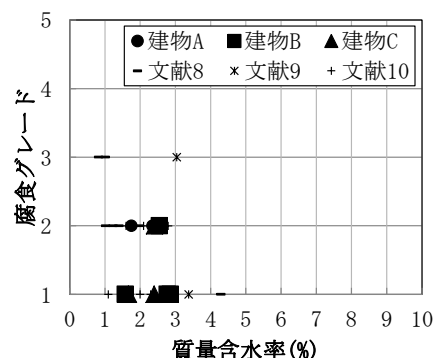


図-11 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と鉄筋の腐食グレードの関係

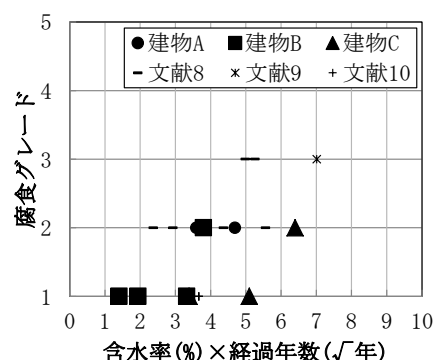


図-12 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と中性化後の経過年数の積と鉄筋の腐食グレードの関係

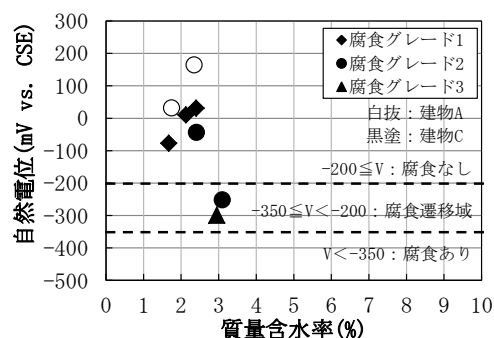


図-13 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と自然電位の関係

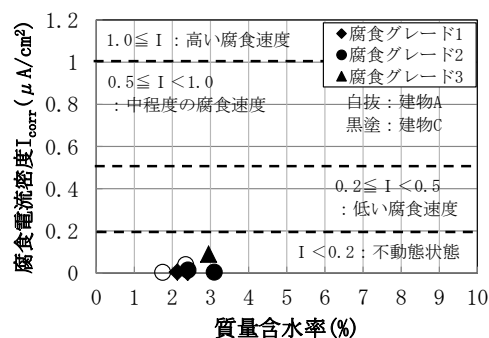


図-14 鉄筋位置まで中性化した部位の質量含水率と腐食電流密度の関係

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が考えらえる。

4. まとめ

築31～84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) 圧縮強度、ヤング係数ともに、質量含水率と概ね正の相関が認められる。
- (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検討した。
- (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鉄筋の腐食グレードに概ね正の相関が認められる。

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.1，2016.7
- 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) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 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
- 19) ASTM-C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete，<http://www.astm.org/2009>
- 20) 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