

論文 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

木野瀬 透*1・今本 啓一*2・田沼 毅彦*3・清原 千鶴*4

要旨：本研究は既存 RC 造建築物の調査を通して、RC 造建築物の耐久性を評価するうえで重要なコンクリートの中性化による鉄筋腐食をコンクリート中の水分に注目して検討を行った。その結果、コンクリートの質量含水率と中性化の進行速度には一定の相関が確認でき、乾燥した状態であるほど中性化の進行が速くなる傾向が得られた。また、コンクリート中の鉄筋の腐食状況を確認した結果、屋内外環境ともに中性化が鉄筋まで到達していない箇所では軽微であることが確認された。鉄筋腐食が顕著になる箇所は、かぶり厚さの小さい、かつ乾湿の繰り返しが起きる箇所である可能性が示唆された。

キーワード：中性化、表層透気性、質量含水率、相対湿度、かぶり厚さ、鉄筋腐食

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建築物の長期利用の重要性が求められている。本研究の目的は、鉄筋コンクリート造の耐久性を評価するうえで要諦を成す中性化による鉄筋の発錆条件の解明と、その非・微破壊的評価である。コンクリートの中性化を対象とした場合、一般に、建築物の外部環境下では中性化が鉄筋に到達した時点が鉄筋の腐食開始時期とされるが、本研究ではこの解釈の妥当性を構造物の現地調査を通して検証する。一方、かぶり厚さまで中性化が進行していたとしても、最終的には鉄筋が腐食していなければ構造物としての所要の性能を満足することになり、この解釈を緩用すると、より広い科学的な視点に立つコンクリート

ト構造物の耐久性評価が可能となる。本研究は従来の「かぶり厚さ」、「コンクリートの表層透気性」および等温吸着曲線から得られる「含水率」の情報から、構造物における「鉄筋腐食リスク」を非・微破壊的に評価することを目的として基礎的な検討を行ったものである。

2. 調査概要

2.1 調査対象

本研究では、表-1 に示す 4 棟の既存鉄筋コンクリート造建築物を対象とした。測定箇所平面図および測定対象の所在地を図-1 から図-5 に、既存建築物の外観写真を写真-1 から写真-4 に示す。

表-1 調査対象詳細

記号	詳細			
	竣工年 (築年数)	階	躯体構造	主な仕上がり材種別
A	1971年(43)	14	SRC造	複層塗材+モルタル
B	1977年(49)	5	RC造	複層塗材+モルタル
C	1977年(49)	4	RC造	複層塗材+モルタル
D	1929年(84)	4	RC造	リソイド仕上げ

凡例 ◀ コア採取方向 (水平)

○ コア採取方向 (鉛直下向き)

調査記号 建物記号-No.

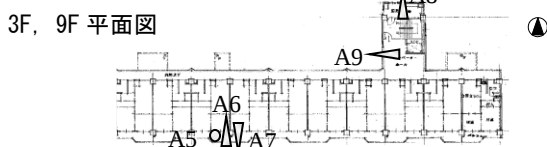
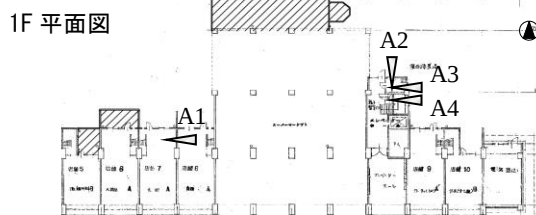


図-1 平面図および調査箇所 (A)

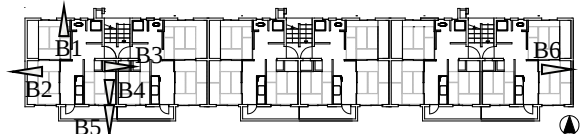


図-2 平面図および調査箇所 (B)



図-3 平面図および調査箇所 (C)

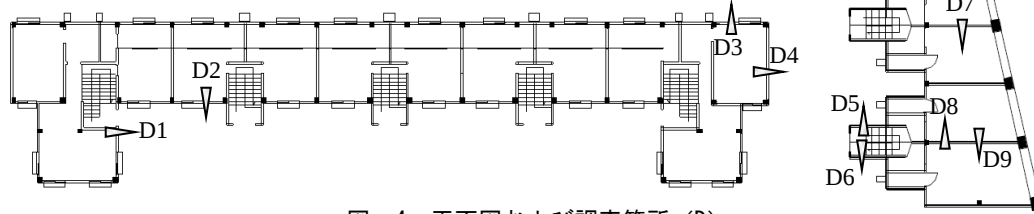
*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 独立行政法人都市再生機構 (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科嘱託補手 工博 (正会員)

凡例 ◀ コア採取方向（水平） 調査記号 建物記号－No.



図－4 平面図および調査箇所（D）

2.2 調査項目

(1) 表層透気性試験

本研究では図－6 に示すダブルチャンバー法トレント試験機を用いて表層透気試験を行った。本試験機は内部と外部に2つのチャンバーを有しており、減圧後（ t_0 ）からある特定の圧力までの到達時間（ t ）から式（1）により透気係数 K_t を求める装置である。

$$K_t = 4 \left(\frac{V_c (dp_i/dt)}{A(p_a^2 - p_i^2)} \right) \frac{\eta p_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

- V_c : 内部チャンバーと接続要素の容積(m^3)
- ε : 所与のコンクリート空隙量 $0.15(m^3/m^3)$
- p_i : 内部チャンバーの気圧(N/m^2)
- A : 内部チャンバーの断面積(m^2)
- η : 空気の粘性係数 $2.0 \times 10^{-5}(Ns/m^2)$

(2) 中性化深さ測定

透気性試験実施箇所と同一箇所において、 $\phi 75mm$ 程度のコアの採取を行い、仕上げ材を有するコアについては仕上げ材を除いたコンクリート部の中性化深さを測定し、下式より中性化速度係数を算出した。

$$C = A\sqrt{t} \quad (2)$$

- C : 中性化深さ(mm)
- A : 中性化速度係数($mm/years^{1/2}$)
- t : 調査時築年数(years)

(3) 深さ方向の含水率分布

鉄筋のかぶり厚さ近辺の含水率を把握するため、ドライビットにより $\phi 75mm$ 程度の乾式コアを採取時に濡れないよう晴天に採取した。コアは仕上げ材の施された部位については仕上げ材を取り除き、コンクリートの表面から約 20mm ごとに切断し（図－7）、 $105^\circ C$ 乾燥炉を用いて、下式により質量含水率を算出した。

$$m = \frac{M - M_{dry}}{M_{dry}} \times 100 \quad (3)$$

- m : 質量含水率(%)
- M : 調査時質量(g)
- M_{dry} : $105^\circ C$ 乾燥後絶乾質量(g)



写真－1 建物外観(A)



写真－2 建物外観(B)



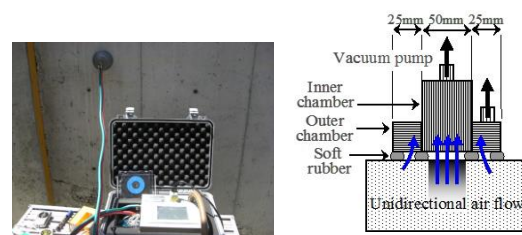
写真－3 建物外観(C)



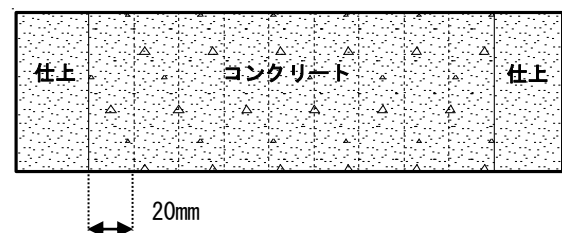
写真－4 建物外観(D)



図－5 各建物所在地



図－6 トレント試験機概要図



図－7 質量含水率測定図

(4) コンクリート内部温湿度測定

ドライビットを用いてφ28mm程度の削孔を行い、小型温湿度データロガーを内外部の任意の箇所に埋設することによりコンクリート内部湿度を測定した。各調査対象で測定期間は概ね4～6か月程度とした。

(5) 水蒸気吸着等温試験

水蒸気吸着等温線は定容法の蒸気吸着法により測定した。使用する試料は中性化深さ測定後のコアもしくは含水率測定後の乾式コアの各部位におけるかぶり厚さ位置とし、150μ以下の粉状に調整したのち、真空凍結乾燥装置において2日間乾燥させたものを用いた。

(6) 鉄筋のかぶり厚さおよび腐食グレード

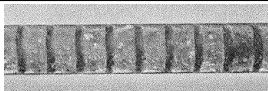
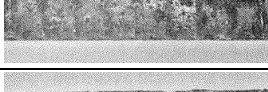
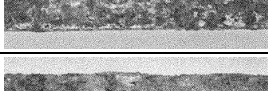
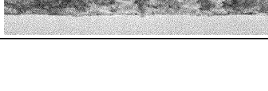
鉄筋のかぶり厚さはコンクリート表面をはつり、ノギスにより計測した値を用いた。その際、表-2に示すように日本コンクリート工学協会「コンクリートのひび割れ調査、補強・補修指針2013」¹⁾に基づき鉄筋の腐食グレードを0から4の範囲で付することとした。

3. 結果・考察

3.1 透気係数—中性化速度係数 各調査対象における

透気係数と中性化速度係数の関係を図-9から図-12に示す。図-10では、打放し箇所において透気係数が大きくなるほど中性化速度係数が大きくなる傾向が認められるが、その他の建築物においては打放し箇所が少なく比較が困難である。また、透気係数が小さく中性化速度係数が大きい箇所（灰色■）があるが、これは仕上げ材の補修を行った箇所である。各調査対象におけるモルタルおよび複層塗材等の仕上げ材付きコンクリート部位では、透気係数と中性化速度係数の関係に相関性は認められない結果となった。トレント試験機は、仕上げ材を含めたコンクリートの表層透気性を評価しており、仕上げ材の厚さや緻密の程度に影響を受けることによるものだと考えられる。ゆえに一般

表-2 鉄筋の腐食グレード¹⁾

グレード	腐食状況	
0	腐食なし	
1	部分的な腐食 軽微な腐食	
2	表面全体の腐食	
3	全周に断面欠損	
4	2/3~1/2程度の断面欠損	

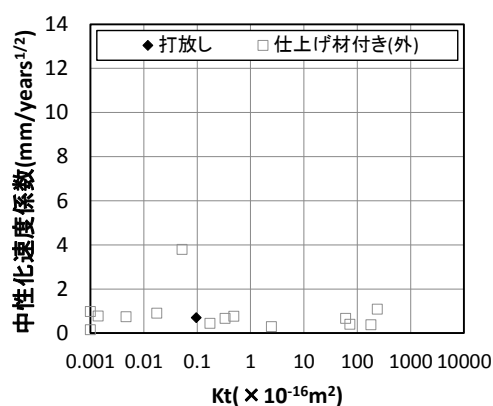


図-9 透気係数と中性化速度係数 (A)

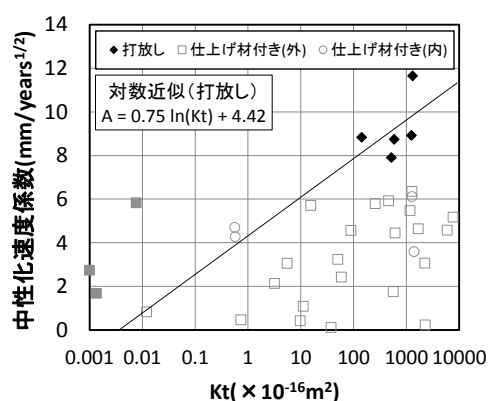


図-10 透気係数と中性化速度係数 (B)

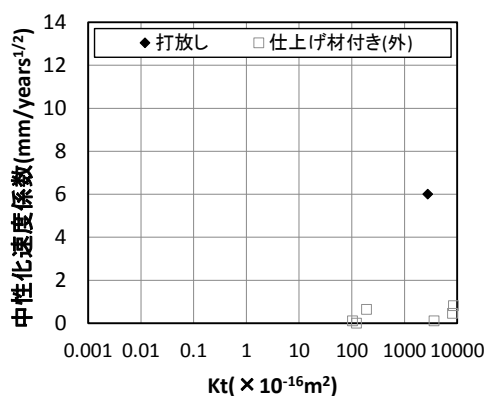


図-11 透気係数と中性化速度係数 (C)

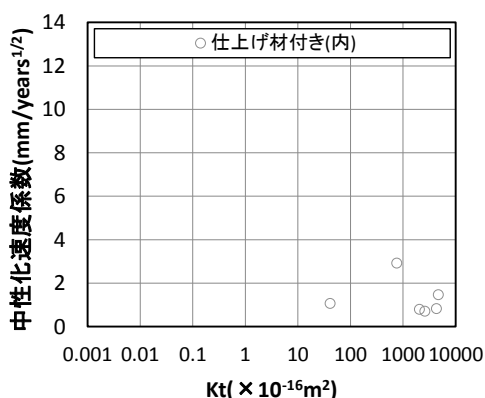


図-12 透気係数—中性化速度係数 (D)

的にコンクリート建築物には仕上げ材を施されることから、透気係数のみによる中性化の予測を行う場合、仕上げ材による影響をどのように評価するかが要諦となる。

3.2 質量含水率

調査対象A, BおよびCにおけるコンクリート内部湿度測定および乾式コアによるかぶり厚さ位置における相対湿度と質量含水率の関係を図-13 から図-15 に示す。図-14 には、併せてコアサンプルから得た等温吸着曲線を示す。各図において、相対湿度の増加に伴い、質量含水率も増加する傾向が認められた。

また、その相対湿度と質量含水率の関係は等温吸着

曲線と非常に近い結果を示しており、実構造物のコンクリート内部相対湿度は等温吸着曲線により質量含水率と関連付けることが可能となると考えられる。なお、図-13 に示す A では、ばらつきが図-14、図-15 に示す B, C に比べて大きくなっているが、これは切断の際に切断幅が 20mm と狭くなっていることにより、コンクリート片中の粗骨材率にばらつきが生じたことが原因と考えられる。図-16 から図-18 にそれぞれの調査対象における仕上げ材の有無による鉄筋のかぶり厚さ位置での質量含水率と中性化速度係数の関係を示す。一般的にコンクリート中の含水状態が中性化の進行に影響することが知られており²⁾、本研究において

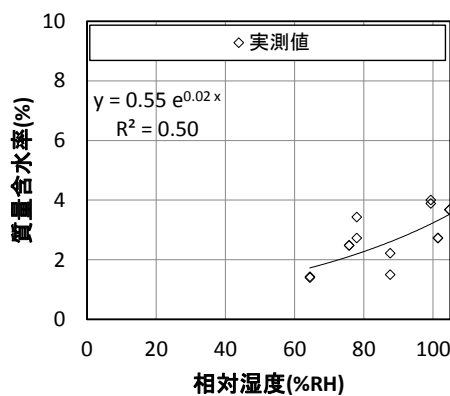


図-13 相対湿度－質量含水率 (A)

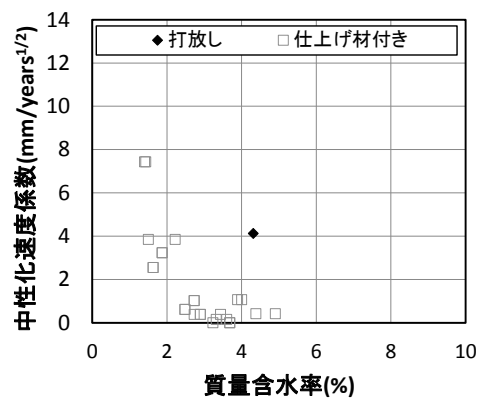


図-16 質量含水率－中性化速度係数 (A)

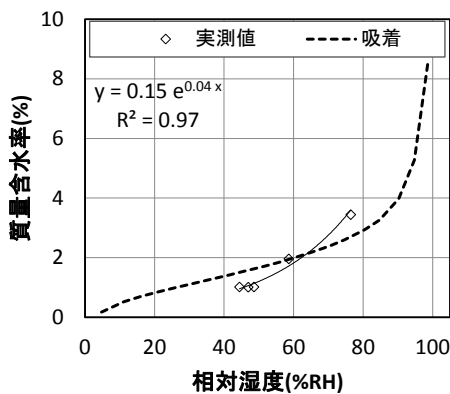


図-14 相対湿度－質量含水率 (B)

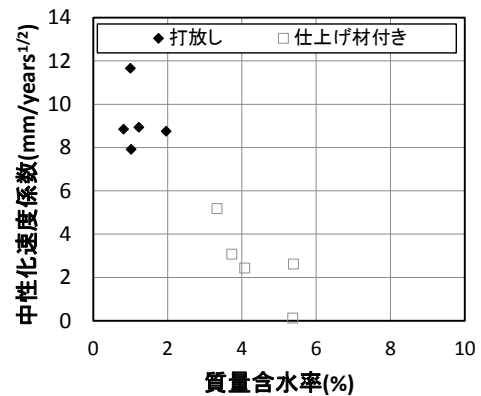


図-17 質量含水率－中性化速度係数 (B)

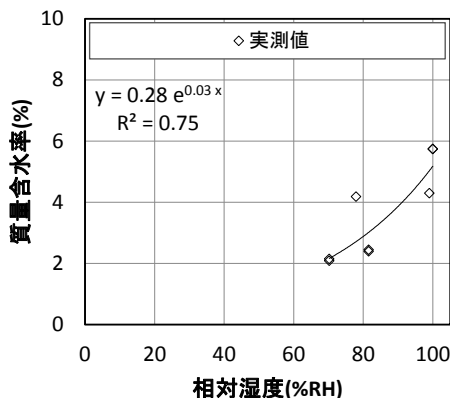


図-15 相対湿度－質量含水率 (C)

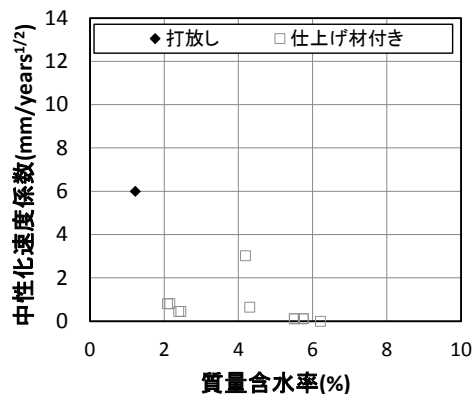


図-18 質量含水率－中性化速度係数 (C)

も質量含水率の増加に伴い、中性化速度係数は低下する傾向が確認された。Aにおける打放し部位では仕上げ材を施された箇所と比較して中性化速度係数が大きくなるが、BおよびCにおいて仕上げ材の有無に関わらず傾向が確認されたためこの評価方法は概ね有用であると考えられる。したがって、コンクリートの中性化の進行を非破壊で正確に予測するうえで、コンクリートの含水率もしくは内部湿度の把握が必要となる。また、より非破壊に近い形でコンクリートの水分の影響に基づく中性化の進行評価を行うためには、内部湿度はコンクリートの曝されている雰囲気湿度から今後予測する必要があると考えられる。

3.3 鉄筋腐食状況

図-19、図-20に調査対象A、B、CおよびDの屋内外におけるコンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さの差、即ち中性化残りとコンクリートの質量含水率の関係を鉄筋の腐食グレード別に示す。グレードが3以上の箇所では、併せてかぶり厚さを示す。一般的に中性化残りが0、即ち中性化が鉄筋まで到達した時点でコンクリートの中性化が進行し始めているが、本調査においても中性化残りが正の箇所では高い腐食グレードを示した箇所は少ない。

なお、コンクリートが鉄筋のかぶり厚さまで中性化が到達した場合、質量含水率が3.5%以上で鉄筋の腐食の進行が促進されると知られている³⁾が、本研究における実構造物調査では、含水率が高い箇所では図-16から図-18に示すように中性化速度係数が低く、図-21、図-22に示すようにかぶり厚さが大きい箇所においては中性化がかぶり厚さまで到達することが少なかった。屋外環境では、かぶり厚さまで中性化した箇所においてコンクリートの質量含水率が4.19%でグレード3の箇所が確認されたが、3.5%未満の箇所においても鉄筋の腐食が顕著であった。屋外のかぶり厚さが小さい箇所における質量含水率は、天候の影響を大きく受けるため、調査時が晴天でコンクリート内部が乾燥していたことが原因と考えられる。したがって、降雨による乾湿の繰り返しが鉄筋の腐食進行に影響したと考えられる。屋内環境では、かぶり厚さまで中性化した含水率の低い箇所においてグレード3が確認された。屋内の鉄筋まで中性化が到達した箇所において、表-3

表-3 かぶり厚さまで中性化した鉄筋の腐食状況

調査箇所	階	屋内外	中性化残り (mm)	かぶり厚さ (mm)	鉄筋の腐食 グレード	質量含水率 (%)
B3	3	内	0	54	1	1.02
B3	2	内	0	40	1	1.96
B3	1	内	0	52	1	1.23
A6	9	内	-4.7	44	1	1.40
D3	2	内	0	85	2	1.18
B3	5	内	0	58	2	0.82
B3	4	内	0	42	2	1.01
A1	1	内	-4	23	0	4.29

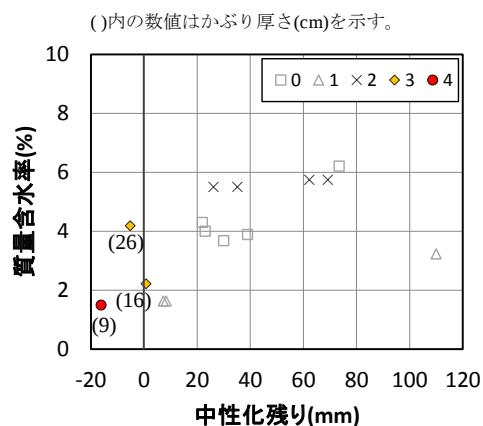


図-19 中性化残り－質量含水率（屋外）

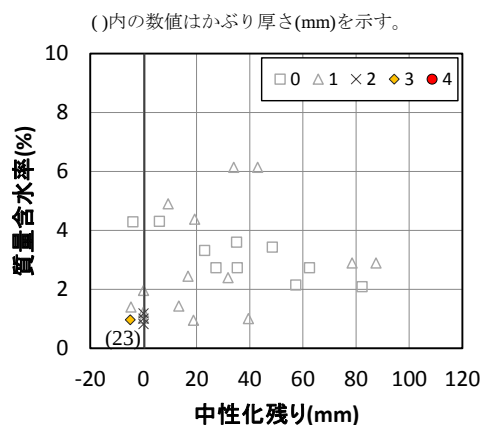


図-20 中性化残り－質量含水率（屋内）

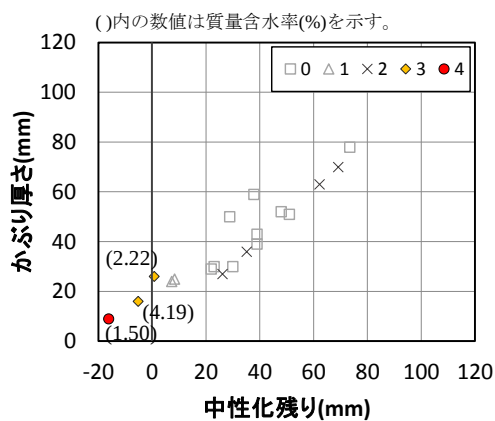


図-21 中性化残り－かぶり厚さ（屋外）

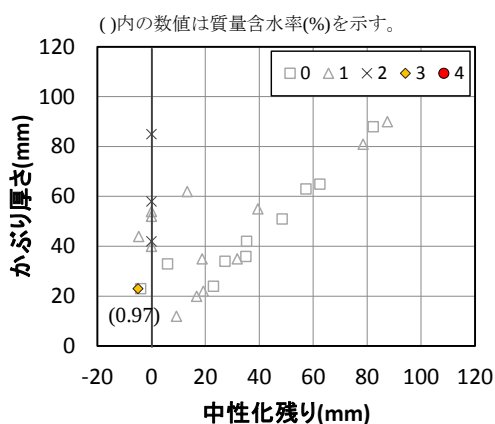


図-22 中性化残り－かぶり厚さ（屋内）

に示すように屋内環境では質量含水率が低いかつかぶり厚さが 40mm 以上、または、かぶり厚さが小さいとしても質量含水率が 4%程度の箇所では鉄筋腐食は軽微であった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 打放しコンクリート部位において、透気係数が大きくなるに伴い、中性化速度係数が大きくなる傾向が得られ、ダブルチャンバー法トレント試験機はコンクリートの中性化進行予測に有意な非破壊試験である。
- (2) 仕上げ材の有無に関わらず、コンクリートの含水率が大きくなるに伴い、中性化速度係数が小さくなる傾向が認められた。したがって、質量含水率はコンクリートの中性化の進行を評価するうえで、重要な要因と考える。
- (3) コンクリートの質量含水率はコンクリート中の鉄筋の腐食リスクに必要な腐食要因であると考えられる。
- (4) 屋外においては、中性化が鉄筋まで到達していない箇所においても腐食グレード 2 以上の箇所があり、かぶり厚さが小さい箇所において、3 以上になる傾向が認められた。
- (5) 屋内環境において、中性化が鉄筋に到達していな

い箇所では腐食は進行しておらず、中性化が鉄筋まで到達したかぶり厚さの小さい箇所でのみ腐食グレードが高くなる傾向が得られたものの、総じて腐食は軽微であった。これは含水率が低いもしくはかぶり厚さが大きいことによると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、RC 造建築物の耐久設計研究小委員会（主査：野口貴文東京大学教授）の活動の一環として行われたものである。ここに記して深謝を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2013
- 2) 鶴木圭一，兼松学：局所的な内部温・湿度環境がコンクリート造建築物に及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.968-972, 2009
- 3) 山本佳城，衣笠秀行，古賀一八，梶田佳寛：コンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, pp.535-540, 2001