

10. コンクリートの含水状態と鉄筋の腐食環境を簡易に評価するための 実験的検討

Experimental Study for Simple Evaluating Water Content in Concrete and Corrosion Environment of Re-bar

加藤 猛*¹ 山崎 順二*²

要 旨

簡易かつ損傷が小さくコンクリートの含水状態を把握するために、既存建築物および実大の試験体において、φ10mm 程度の孔により、試験が実施できる電気抵抗式水分計の測定とその同一面から乾式で外径 76mm 以上のコア供試体を採取し、質量含水率を測定した。その結果、普通セメントおよび天然骨材を用いたコンクリートに限定すれば、電気抵抗式水分計で得られる指示値と質量含水率には、高い相関が得られた。また、指示値と質量含水率の回帰線に実測値のばらつきを考慮することで、電気抵抗式水分計により、コンクリートの含水状態を概ね評価できることがわかった。さらに既往の文献を基に、電気抵抗式水分計の指示値とかぶり厚さによって鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状を評価する案を示した。

キーワード：質量含水率／電気抵抗式水分計／カウント値／かぶり厚さ／鉄筋の腐食環境

1. はじめに

にコンクリート構造物の耐久性能は、鉄筋腐食の程度によって判断される。鉄筋腐食は塩化物や中性化が起因となって鉄筋の不動態皮膜が破壊されたあとは、鉄筋に酸素と水が供給されることで進行する。そのため、鉄筋付近のコンクリートの含水状態を把握することは重要である。

建築物におけるコンクリートの含水状態を測定する方法として、乾式によりコア供試体を採取し、JIS A 1476「建築建材の含水率測定方法」¹⁾によって質量基準質量含水率(以下、質量含水率と称す)を測定する方法(以下、乾式コア工法と称す)がある。乾式コア工法はサンプルを得るために躯体への損傷が大きく、コア穴の補修が容易でない。また、質量含水率を得る過程でコア供試体の切断および絶乾状態になるまで乾燥させる必要があるため多大な労力を要する。この乾式コア工法よりも、手順が簡易かつ損傷が小さく試験が実施できる電気抵抗式水分計によりコンクリートの含水状態の評

価ができるかを検討する。さらに、既往の文献を基に電気抵抗式水分計の指示値により鉄筋が腐食環境にあるかを判断するための評価案の作成を試みた。

そこで、既存建築物や実大試験体に対して電気抵抗式水分計と乾式コア工法による質量含水率の測定の実施と、腐食環境の判断基準を設定するための文献調査を行った。

2. 試験対象、電気抵抗式水分計および試験の概要

2.1 試験対象の概要

表-1 に既存建築物および実大試験体の概要を示す。表中の記号について、実大 RC 構造体と柱試験体はセメント種類がわかっているため、試験場所-セメント種類を示し、既存建築物である倉庫と集合住宅については試験場所-コンクリート種類 (Nc : 普通コンクリート、Lc : 軽量コンクリート) を示している。実大 RC 構造体および柱試験体は同一の敷地内にあり、実大 RC 構造体は、H3000×W3400×t200mm の壁部材を屋内側から試験とコア

表-1 既存建築物および実大試験体の概要

名称	実大 RC 構造体		柱試験体				倉庫	集合住宅	
記号	M-N		M-BB				S-Nc	N-Nc	N-Lc
竣工年	2004 年	2007 年	2017 年	2018 年	2017 年	2018 年	1970 年	1981 年	
調査時材齢	18 年	15 年	5 年	4 年	5 年	4 年	53 年	42 年	
備考	27-18-20N	33-18-20N	27-12-20N	33-12-20N	27-12-20BB	33-12-20BB	Fc=210kg/cm ² (普通コン)	Fc=225kg/cm ² (普通コン)	Fc=210kg/cm ² (軽量コン)
測定面	打放し面 水掛り無		打放し面 水掛り有				複層塗材 水掛り有	打放し面と仕上り 水掛り無	
試験対象の 写真									

*¹ 技術研究所 建築材料研究グループ *² 技術研究所長

供試体の採取を実施している。柱試験体は 840mm 角、高さ 1200mm であり、普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントが用いられている。また、柱試験体は屋外暴露されていたが、試験時には屋内に静置している。集合住宅での試験とコア供試体の採取は、普通コンクリート部分は屋外の打放し面であり、軽量コンクリート部分は石膏ボードが張られていた屋内と複層塗材が施されていた屋外で実施している。

2.2 電気抵抗式水分計の概要

電気抵抗式水分計を図-1 に示す。電気抵抗式水分計は、図のように孔径 $\phi 10\text{mm}$ 、孔の中心距離 50mm に電気ブラシを挿入することで電気抵抗を測定する。また電気ブラシ部の長さは 18mm であり、挿入深さはコンクリート表面から 18、30、50mm としている。挿入深さ 18mm は 0～18mm、挿入深さ 30mm は 12～30mm、挿入深さ 50mm は 32～50mm の位置であり、測定結果は電気抵抗式水分計の指示値であるカウント値で示す。

2.3 試験の概要

表-2 にサンプリング方法と測定値の扱い方に関する概要を示す。各測定位置において、電気抵抗式水分計および乾式コア工法を実施し、乾式コア工法では、外径が $\phi 76\text{mm}$ 以上となるようコア供試体を採取した。また、コア供試体の表層から 50mm まで 10mm の厚さで切断し、質量含水率を測定した。

3. 質量含水率とカウント値の測定結果

3.1 質量含水率の深さ方向の分布

表層から深さ方向の質量含水率の分布を図-2 に示す。図の例として表層から深さ 10mm の質量含水率は表層(0mm) から 10mm のコア供試体の質量含水率を示している。図より、いずれも表層からコンクリートの内部にかけて質量含水率が増加している傾向がみられる。

実大 RC 構造体および柱試験体について、実大 RC 構造

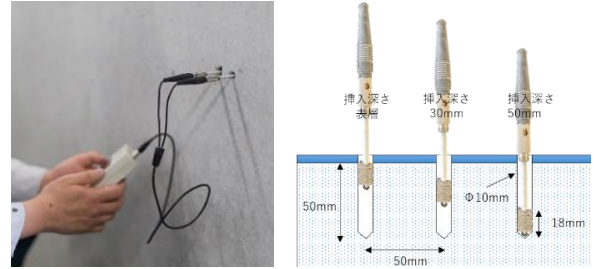


図-1 電気抵抗式水分計

表-2 サンプリングと測定値の概要

試験対象の名称	サンプリング方法と測定値の扱い方	
	質量含水率	電気抵抗式水分計
実大 RC 構造体	呼び強度ごとに 3 本採取した平均値	呼び強度 27 で 8 点、呼び強度 33 で 4 点測定した平均値
柱試験体	呼び強度、セメント種類ごとに各 1 本	呼び強度、セメント種類ごとに 2 点測定した平均値
倉庫	電気抵抗式水分計を測定した位置でコア供試体を採取(計 4 本)	
集合住宅	普通コンで 3 本、軽量コンで 2 本採取した平均値	普通コン、軽量コンともに 3 点測定した平均値

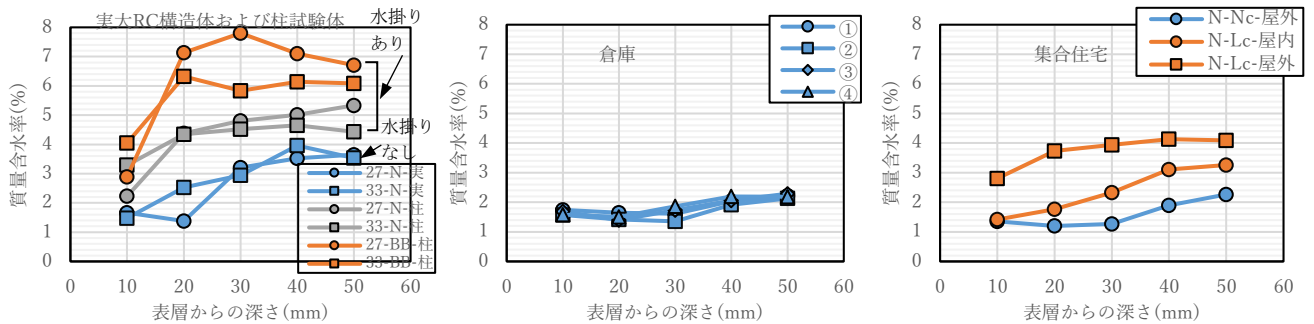


図-2 表面から深さ 10mm ごとの質量含水率の分布

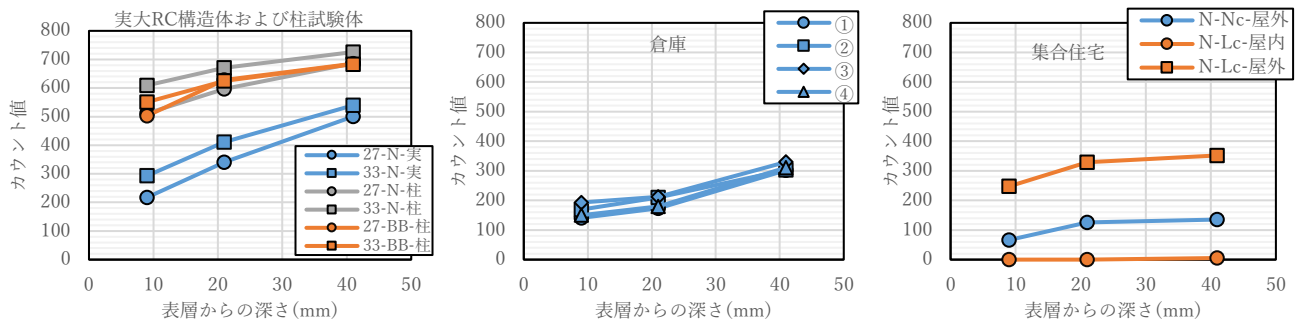


図-3 電気抵抗式水分計によるカウント値の深さ方向の分布

体と普通ポルトランドセメントを用いた柱試験体には、材齢の違いはあるが、水掛かりのある柱試験体の方が、1～1.5%ほど質量含水率が高いことがわかる。続いて、柱試験体は静置環境が同一に関わらず、普通ポルトランドセメントよりも高炉セメント B 種を用いた柱試験体の質量含水率の方が高く、表層から 20mm より深い位置での質量含水率は約 6%以上に高かった。倉庫について、静置環境は水掛かりのある位置であるが、複層塗材がコンクリート中への水の浸入を遮蔽したことで、深さ 50mm の位置でも質量含水率は 2%程度に低かったことが考えられる。集合住宅について、屋外に面している普通コンクリートは、直接的な水掛かりがないものの、屋内に面した軽量コンクリートよりも質量含水率は低く、両者の質量含水率は表層から 10mm の深さでは同程度であるが、表層からの深さが 30mm 以上となると軽量コンクリートの質量含水率が 1%ほど高い。軽量コンクリートは軽量骨材の水分を保持する性能により屋内の環境下であっても屋外に面する普通コンクリートより質量含水率が高かったことが考えられる。また、軽量コンクリートの屋外は直接的な水掛かりはないが、表層から 20mm 以上の質量含水率は 4%程度と高いことがわかる。

3. 2 カウント値の深さ方向の分布

表層から深さ方向のカウント値の分布を図-3 に示す。各挿入深さにおけるカウント値は長さ 18mm の電気ブラシの中心の位置を表層からの深さとし、挿入深さ 18mm の位置は 9mm、挿入深さ 30mm は 21mm、挿入深さ 50mm は 41mm としている。図-3 より、カウント値の深さ方向の分布は、質量含水率の分布と概ね同様な傾向が得られている。質量含水率の分布と異なる点として、柱試験体においては、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの質量含水率は普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも高いが、カウント値では同程度であること。また、集合住宅においては、軽量コンクリートの質量含水率は普通コンクリートよりも高いが、カウント値では屋内であると低くなり、いずれの深さにおいてもほぼ 0 を示していることが挙げられる。

3. 3 カウント値と質量含水率の関係

カウント値と質量含水率との関係を図-4 に示す。カウント値と質量含水率との関係として、挿入深さ 18mm のカウント値は 0～10mm と 10～20mm のコア供試体による質量含水率の平均値との関係性を示し、続いて、挿入深さ 30mm は 10～20mm と 20～30mm のコア供試体による質量含水率の平均値、挿入深さ 50mm は 30～40mm

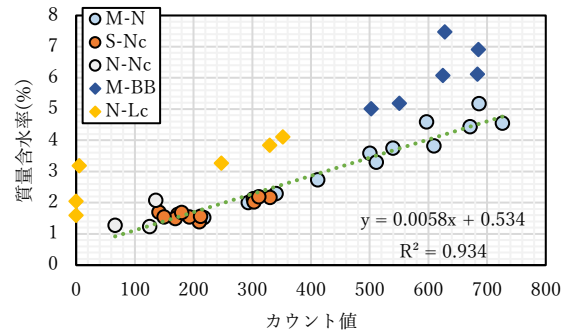


図-4 カウント値と質量含水率の関係

と 40～50mm のコア供試体による質量含水率の平均値との関係性を示している。

図より、カウント値が高いと質量含水率が高くなる傾向にある。既存建築物において一般的に設計図書に普通コンクリートと記載されていれば、建築物の上部構造のコンクリートに用いられるセメントは、普通ポルトランドセメントであると考えられる。また、骨材に関しても、コア供試体の側面の目視観察により、天然骨材が用いられていることが考えられる。以上から、S-Nc および N-Nc を普通ポルトランドセメントおよび天然骨材を用いたコンクリート（普通天然コンと称す）とすると、M-N、S-Nc および N-Nc のように普通天然コンに限定すれば、決定係数は $R^2=0.934$ と非常に高い相関が得られている。高炉セメント B 種や軽量骨材を用いたコンクリートの質量含水率は、普通天然コンの回帰線における質量含水率よりも高い。また、軽量コンクリートに関して、カウント値がほぼ 0 であるのに対し、質量含水率は約 1.5～3.0%に分布している。そのため、軽量コンクリートに対して電気抵抗式水分計によるコンクリートの含水状態の評価を適用する場合には、質量含水率が 3%未満に低いとその違いを評価することが難しいと考える。

以上の結果から、カウント値と質量含水率には高い相関が得られているものの、電気抵抗式水分計によりコンクリートの含水状態を評価する際には、セメントや骨材の種類に留意する必要がある。

4. カウント値による鉄筋の腐食環境の評価（案）

4. 1 質量含水率による鉄筋の腐食環境の考え方

2022 年に改訂された JASS 5²⁾では、一般劣化環境において、水の作用の有無により、鉄筋の腐食環境と非腐食環境で分類されている。コンクリート中の水分量が少ないと非腐食環境、つまり鉄筋の腐食因子が存在しないとみなし、中性化が鉄筋に到達しても、鉄筋腐食はほとんど発生しないとしている。しかし、腐食環境が非

表-3 含水率と鉄筋の腐食に関する既往の研究の概略

研究者	研究の概要	論文からの抜粋
古賀ら ³⁾	塩害環境下における既存建築物の含水率、中性化深さ、鉄筋の腐食状況の調査	塩化物イオン濃度が 1.2kg/m ³ 以上でも含水率が 3.5%以下では鉄筋の腐食が生じていない
木野瀬ら ⁴⁾	複数の既存建築物におけるかぶり厚さ、質量含水率、中性化深さ、鉄筋の腐食状況の調査	かぶり厚さが 23mm と小さく、中性化が鉄筋に到達しても質量含水率が 4%程度であれば鉄筋腐食は軽微であった
田沼ら ⁵⁾	築 53 年経過した既存建築物のかぶり厚さ、質量含水率、中性化深さ、鉄筋の腐食状況の調査	雨掛りのない環境では、中性化深さの大小によらず鉄筋腐食は軽微であり、質量含水率は 3%以下であった
酒井ら ⁶⁾	促進試験により、中性化させたコンクリート試験体における質量含水率と鉄筋の腐食速度の測定	かぶり厚さが 20, 30mm では、中性化が鉄筋に到達しても質量含水率が 4%以下であれば、不動態状態と同等の鉄筋の腐食速度であった

腐食環境の分類方法としては主に、外気に接しない屋内の水分供給がない位置であるか、屋外であるかの判断となり、物性値で分類しているわけではない。そこで、既往の文献³⁻⁶⁾を引用することで、物性値により、一般腐食環境における鉄筋が腐食環境にあるかの基準を定める。既往の文献³⁻⁶⁾の概略を表-3にまとめた。表-3から、中性化や塩化物により、鉄筋の不動態皮膜が破壊されても、鉄筋付近の質量含水率が概ね 3.5%以下であれば、鉄筋の腐食程度は軽微であることが示されており、鉄筋の腐食速度は遅緩であると考えられる。このことから鉄筋付近の質量含水率が 3.5%以下であれば鉄筋は非腐食環境にあるとする。鉄筋が腐食環境にある時の考え方について、鉄筋が腐食しやすい質量含水率が存在すると考えられるが現時点では検討不足であること、危険側の評価になり難いことから質量含水率が 3.5%以上であれば鉄筋は腐食環境にあると判断する。

4. 2 質量含水率のばらつきに対する検討

M-N、S-Nc および N-Nc のカウント値と質量含水率の回帰線対して、ばらつきを考慮するため、実測値の 95%が分布する 95%予想区間を図-5に示す。今後、サンプルを増やしても、質量含水率は概ね青線の範囲に分布することが考えられる。また、図中に質量含水率が 3.5%の位置を示すと 95%予想区間の上限線はカウント値がおおよそ 400 で交差しているため、カウント値が 400 未満であれば、質量含水率は 3.5%を超えることがほとんどないと考えられる。一方で、95%予想区間の下限線はカウント値がおおよそ 620 で交差しているため、カウント値が 620 を超えると質量含水率はほぼ 3.5%を超えているといった考え方ができる。このように、ばらつきを考慮することで、電気抵抗式水分計により、コンクリートの含水状態を概ね評価できると考える。

4. 3 中性化深さとかぶり厚さについて

岸ら⁷⁾は、土木構造物のかぶり厚さ、中性化深さの調査と雨掛りの有無におけるコンクリートの剥落割合の統計により、図-6の結果を得ている。これにより、中性化残り（かぶり厚さから中性化深さを差し引いた

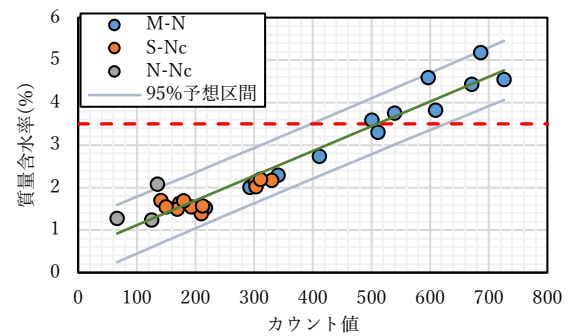
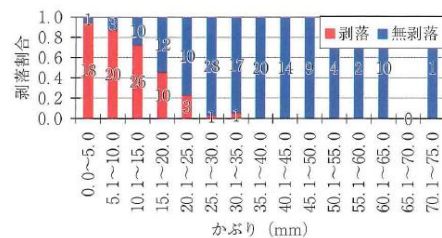


図-5 実測値の 95%予想区間



(a) 剥落割合とかぶりの関係

図-6 コンクリート片の剥落割合とかぶり厚さの関係⁷⁾

もの) が小さいことに加え、かぶり厚さが小さいことによって雨水等の影響を受けるとコンクリートの剥落する確率が高くなるとしている。図-6を参考にすると、かぶり厚さが 30mm 未満になると、コンクリート片が剥落する確率が増加傾向にある。

4. 4 カウント値とかぶり厚さによる鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状の評価(案)

これまでの結果から、カウント値 400 を鉄筋が非腐食環境の境界、カウント値 620 を鉄筋が腐食環境の境界とし、鉄筋が腐食環境にあるかを判断する。加えて、鉄筋腐食が生じるとコンクリート片の剥落が生じる危険性がある境界をかぶり厚さ 30mm とすることで、鉄筋腐食により想定される劣化性状を示す。その境界条件からカウント値とかぶり厚さの物性値による鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状の評価案を表-4に示す。

等級について、かぶり厚さが 30mm 未満の時には、コンクリート片の剥落の危険性があるため、詳細に劣

化性状とその対策案を区分した方が望ましいと考え、カウント値の範囲を 620 以上、400 以上 620 未満、400 未満の 3 つに区分した。等級Ⅱは非腐食環境とした質量含水率 3.5%未満と腐食環境とした質量含水率 3.5%以上が混在しており、腐食確率か非腐食環境かは不明確な範囲である。そのため、等級Ⅱは腐食環境と考えられる状態とした。等級Ⅲは、非腐食環境とされるが、か

ぶり厚さが小さいため一時的な水の作用を受けると、その影響を受け鉄筋付近におけるコンクリート中の水分量が多くなり、一時的に腐食環境になることも考えられる。よって、想定される劣化性状は、コンクリート片の剥落が潜在的にあるとしている。

かぶり厚さが 30mm 以上あれば、一時的な水の作用を受けても、鉄筋位置におけるコンクリートの水分量は大きく変化しないと考えられるため、カウント値が 400 未満であれば鉄筋は非腐食環境にあるとしている。また、かぶり厚さが 30mm 以上であるとコンクリート片が剥落する危険性は少ないが、コンクリート中の水分量等によっては、鉄筋が腐食する可能性はあるため、補修を考える際には、中性化残りや含水状態に応じた検討が必要であるとする。

なお、この評価案は試験を実施した時点での現状評価であって、外気の変化に伴う鉄筋の腐食環境の変化は評価できていないため、今後の検討事項である。

4. 5 評価(案)の使用例

x 軸をかぶり厚さ、y 軸をカウント値としたグラフに表-4 を適用した結果を図-7 に示す。また、図-7 には図-3 のカウント値の深さ方向の分布より、例として実大 RC 構造物および柱試験体における 33-N-柱のかぶり厚さを 25mm、集合住宅における N-Nc-屋外のかぶり厚さを 35mm と仮定した時のカウント値を併記する。このカウント値は各深さにおける測定結果を線形補間して得られた値である。

図-7 を用いることで、カウント値とかぶり厚さがわかれば、表-4 に基づく鉄筋の腐食環境の判断を視覚的に行うことができる。等級Ⅴであれば、鉄筋が非腐食環境にあり、中性化が鉄筋に到達しても、腐食速度は遅緩であると考えられる。これにより、この時の補修案としては、水や CO₂ の進行に対する対策を講じる必要性が低いと、物理的な要因よりも美観性に重点を置くよ

表-4 鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状の評価(案)

物性値	鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状
かぶり厚さが 30mm 未満、鉄筋付近のカウント値が 620 以上	等級Ⅰ：かぶり厚さが小さく、鉄筋が腐食環境にある可能性が高く、コンクリート片の剥落の危険性が非常に高い
かぶり厚さが 30mm 未満、鉄筋付近のカウント値が 400 以上 620 未満	等級Ⅱ：かぶり厚さが小さく、鉄筋が腐食環境にあると考えられるため、コンクリート片の剥落の危険性がある
かぶり厚さが 30mm 未満、鉄筋付近のカウント値が 400 以下	等級Ⅲ：鉄筋は非腐食環境にあるが、水の作用によっては腐食環境になる可能性がある。また、かぶり厚さが小さいためコンクリート片の剥落の危険性が潜在的にある
かぶり厚さが 30mm 以上、鉄筋付近のカウント値が 400 以上	等級Ⅳ：鉄筋は腐食環境にある可能性があるが、一定のかぶり厚さがあるため、コンクリート片の剥落の危険性が少ない
かぶり厚さが 30mm 以上、鉄筋付近のカウント値が 400 以下	等級Ⅴ：鉄筋が非腐食環境にあり、一定のかぶり厚さもあるため、コンクリート片の剥落の危険性がほとんどない

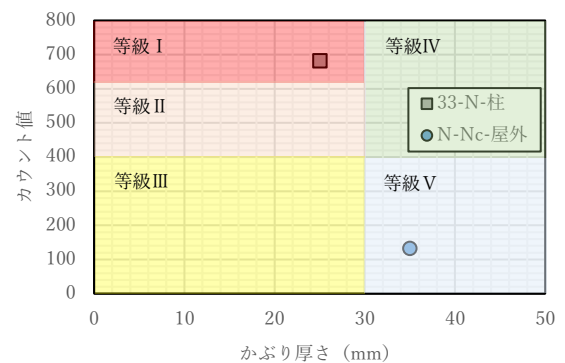


図-7 評価(案)の使用例

うな材料や工法による補修方法の選定が可能にあると考える。一方で、等級Ⅰであれば、中性化が鉄筋に到達すると鉄筋の腐食が進行していくことが考えられるため、中性化残りに応じた補修方法が考えられる。例えば、中性化残りが 10mm 以上あれば、未中性化部が大半存在していることが予測されるため、水と CO₂ ともに進行を抑制するような材料による補修が望ましい。中性化残りが 10mm 未満であると、未中性化部の割合は少くなるため、CO₂ の遮蔽より、水の浸入抵抗性に特化した材料による補修が望ましいと考える。

今後の検討課題として、上記のようにかぶり厚さとカウント値による鉄筋の腐食環境の評価と中性化の進行程度に応じた補修方法が選定できるフローを整備する必要があると考える。

5. まとめ

コンクリートの含水状態を簡易に把握するため、既存建築物や実大試験体に対して電気抵抗式水分計と乾式コア工法による質量含水率を測定した。また、鉄筋の腐食環境を簡易的に評価するため、既往の文献を基にした判断基準から電気抵抗式水分計の指示値により鉄筋の腐食環境を評価するための検討を行った。その結果を以下に示す。

- 1) 電気抵抗式水分計の指示値であるカウント値と質量含水率には $R^2=0.934$ の高い相関が得られている。ま

た、カウント値と質量含水率の回帰線に実測値のばらつきを考慮することで、電気抵抗式水分計により、コンクリートの含水状態を概ね評価できた。ただし、高炉セメントや軽量骨材が用いられていたコンクリートの場合には、その相関とは異なる傾向を示したため、適用する際にはセメントや骨材の種類に留意する必要がある。

- 2) 既往の文献から、質量含水率が 3.5%未満であれば鉄筋は非腐食環境にあるという考え方とかぶり厚さが 30mm 未満であるとコンクリート片の剥落の可能性が高いという考え方を基に、かぶり厚さとカウント値による鉄筋の腐食環境と想定される劣化性状の評価案を示した。しかし、この評価案は試験を実施した時点での現状評価であって、外気の変化に伴う鉄筋の腐食環境の変化は評価できていない。今後、経時変化に対しても検討する。

今後はこの評価案の結果を基に補修方法が選定できるようなフローを整備する必要があると考える。

[参考文献]

- 1) 日本規格協会：日本産業規格：JIS A 1476「建築建材の含水率測定方法」
- 2) 日本建築学会：建築工事仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2022
- 3) 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、コンクリート工学会年次論文報告集、Vol.30、No.1、 pp.783-788、 2008
- 4) 木野瀬透、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、コンクリート工学会年次論文報告集、Vol.37、No.1、 pp.601-606、 2015
- 5) 田沼毅彦、杉山央：築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査、日本建築学会技術報告集、Vol.23、No.53、 pp.37-42、 2017.2
- 6) 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
- 7) 岸利治、横山勇氣、鎌田知久：耐久性照査における中性化深さの役割の変遷、コンクリート工学、Vol.61、No.9、 pp.754-759、 2023.9