

論文 既存 RC 建造物のコンクリート内部相対湿度および腐食環境に関する検討

ス カイティン*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 既存鉄筋コンクリート造建築物を対象とした調査事例に基づき、鉄筋腐食の要因であるコンクリート内部の相対湿度について検討を行った。その結果、鉄筋腐食が進行しやすい環境は、相対湿度 70~90%、かぶり厚さ 30mm 以下の場所であり、乾湿繰り返し作用においてコンクリート内部に酸素が供給されやすくなり、鉄筋腐食を進行させるため、コンクリート内部の湿度の変動を把握することが重要であることを示した。また、かぶり厚さ、仕上げ厚さ、外気の平均相対湿度、外気の湿度変動幅を用いてコンクリート内部の湿度変動幅を予測することが可能であることを示唆した。

キーワード: 既存建造物、中性化、鉄筋腐食、相対湿度、仕上げ材

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート建造物の寿命は中性化が鉄筋位置に到達した時点だと定義されている^[1]。それは中性化により、鉄筋が不動態被膜を失い、防錆能力が低下し、水分と酸素の供給で腐食するからである。過去の実建造物調査では、中性化が鉄筋位置に到達していても、雨掛かりのない場所では鉄筋腐食が顕在化しないことが明らかにされている^[2]。そのため、中性化が鉄筋位置に到達した後の RC 建造物の寿命を評価するには、鉄筋腐食を進行させる要因である水分の影響を評価する指標が必要である。そこで、本研究は、コンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食の関係を踏まえ、環境条件およびかぶり厚さがコンクリート内部の湿度変動に与える影響について検討を行った。

2. 調査対象物件の概要

本研究で対象とした既存 RC 建造物の所在地、用途、竣工年、調査時年数、主な使用仕上げ材種別を表-1に示す。なお、建物 E、Q については混合セメントが使用されていた。かぶり厚さ、鉄筋腐食、中性化、コンクリートの内部相対湿度等の調査項目については、表-3に示す測定方法で調査を行った。また、鉄筋腐食の程度については、表-4に示す指針に基づき、目視判定を行った。調査箇所を選定は、屋内外、雨掛りの有無を考慮し任意の箇所について測定した。なお、雨掛りの有無及び屋内外の定義は表-2に示すものに準ずる。

3. 鉄筋腐食とコンクリート内部相対湿度に関する考察

3.1 中性化深さ

全調査対象物の中性化深さの測定結果を図-1に示す。

*1 東京理科大学 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 東京理科大学 工学部建築学科助手 工博 (正会員)

表-1 建物概要

記号	所在地	用途	竣工年	調査時年数	主な仕上材
A	東京	集合住宅	1965	50	U, P, L, M
B	東京	集合住宅	1987	28	U, L, M
C	東京	集合住宅	1965	50	U, L, M
D	東京	集合住宅	1971	44	U, P, L, M
E	東京	競技場	1958	57	U, F, M
F	愛知	学校	1968	47	U, P, M
G	岐阜	役場	1972	43	P, M, T
H	東京	美術館	1959	58	U, F, M
I	東京	事務所	1962	54	P, M, T
J	千葉	学校	1968	49	U, P, M, T
K	東京	学校	1967	50	P, F, M
L	東京	事務所	1966	51	P, M, T
M	福岡	鉱業場	1943	75	U, M
N	広島	観光施設	1929	89	P, M, T
O	東京	郵便局	1930	88	M, T, Mc
P	宮崎	市民会館	1966	53	U
Q	福岡	事務所	1961	58	U, M

仕上材種別 (U: 打放し, P: ペイント, L: リシン, M: モルタル, F: 吹付モルタル, T: タイル, Mc: 複層塗材)

表-2 雨掛・屋内外の基準

	屋外	屋内
雨掛あり	軒から鉛直下方向150cm以上離れた箇所、又は軒のない外壁	—
雨掛なし	軒から鉛直下方向150cm以内の箇所	空調あり(居室、事務室、体育館等) 空調なし(階段室、機械室、倉庫等)

表-3 調査項目および測定方法

調査項目	調査方法	
	かぶり厚測定	健全部
	鉄筋露出部	スケールで実測
	一部	はつりを行い、スケールで実測
鉄筋腐食測定	目視試験(表-4)	
中性化深さ	JIS A 1152に準じてフェノールフタレイン溶液を噴霧して測定	
コンクリート内部相対湿度	温湿度センサーをコンクリート表層から指定の深さの場所に埋込、2週間から6か月間の期間に測定	

表-4 鉄筋の腐食区分 [6]

グレード	腐食状況	例
1	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない。	
2	部分的に腐食が認められる軽微な腐食。	
3	表面の大部分が腐食している部分的に断面欠損が生じる。	
4	鉄筋全面にわたり断面欠損がある。	
5	鉄筋の断面欠損が当初の2/3~1/2程度欠損している。	

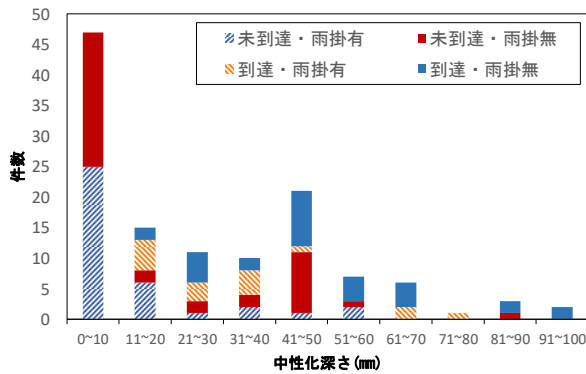


図-1 全調査対象物における中性化深さの件数

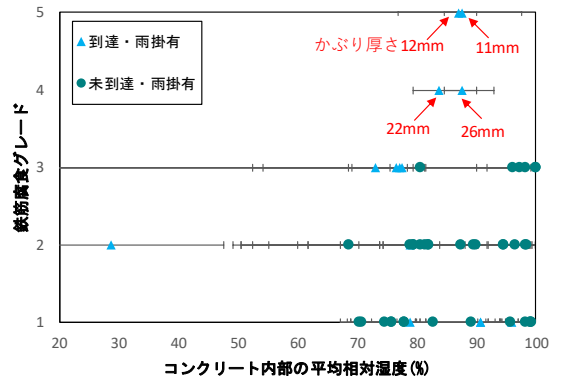


図-2 雨掛有の場所での平均相対湿度と鉄筋腐食の関係

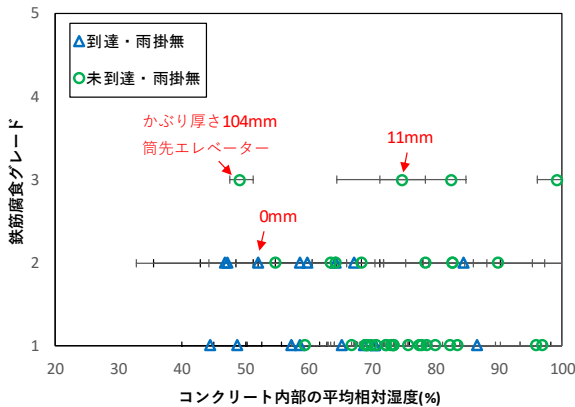


図-3 雨掛無の場所での平均相対湿度と鉄筋腐食の関係

表-5 金属(Cu)表面における水膜厚さ [7]

湿度条件	水膜厚さ (nm)
60% R. H.	0.5
90% R. H.	1
80% R. H.	10
100% R. H.	10 ³
結露	10 ⁴
雨	10 ⁵

雨掛かり無しの箇所では広範囲に分布しており、雨掛かり有の場所よりも中性化が進行しやすいことが分かる。また、鉄筋位置に中性化が到達している箇所は雨掛かり無しの方が多。ただし、中性化深さの測定における誤差に関する既往研究の知見 [3] [4] [5] を踏まえ、中性化残りが 10mm 未満の場合は、腐食の限界点に達しているものとして、中性化は「到達」として以下の考察を行う。中性化残りとは、かぶり厚さから中性化深さを差引いた値である。

3.2 コンクリート内部の相対湿度および鉄筋腐食

コンクリート内部の平均相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係は雨掛かりの有無でそれぞれ図-2 と図-3 に示す。相対湿度の変動幅は各平均相対湿度に横のバーチャートで示す。なお、腐食グレードが高い場合、かぶり厚さの影響を考慮し、図にかぶり厚さを併記する。図-2 により、グレード4~5の激しい腐食が認められるのは相対湿度が80~90%の領域にある。

図-3 では、中性化の鉄筋位置到達の有無に関わらず、

雨掛かりがないため、重度の鉄筋腐食が見られなかった。表-5 は異なる湿度条件下の金属表面に生じる水膜厚さを示す [7]。

表-5 により、大気中の湿気による金属表面に生じる水膜は、相対湿度 80% で 10mm 程とされている。一方、金属の腐食速度は、図-4 に示されるように、水膜厚さ 10mm で最大となる [8]。この水膜厚さより薄い場合は、水分の供給が不足となり、より厚い場合は酸素の供給が不足となると指摘されている [7]。

前述の相対湿度 80% を閾値とする金属分野の見解は一定湿度環境下のものであるが、一般の建築物は変動する湿度環境下に置かれる。以上を鑑みると、雨掛有の部位においては相対湿度 80% 付近を跨ぐように変動する箇所において腐食グレードが高くなっており、一方、雨掛無しの部位において湿度変動はあっても、それが相対湿度 80% を跨がない領域において腐食グレードは低いものとなっている。このように乾湿繰り返し環境下における酸素と水分の供給がなされる状況において鉄筋の腐食が進行するものと考えられる。

3.3 かぶり厚さおよび相対湿度

相対湿度および中性化の影響を考慮せずにかぶり厚さごとの腐食グレードの発生頻度を図-5 に示す。中性化が鉄筋位置に到達の有無に関わらず、鉄筋の腐食グレードの高い場所はかぶり厚さが 30mm より小さい。これにより、重度な鉄筋腐食（グレード 4 以上）はかぶり厚さ 30mm 以下の場所のみに発生しており、かぶり厚さ 50mm 以上の場合では鉄筋が軽度な腐食（グレード 2 以下）に収まることが分かる。

既往の調査結果 [2] および室内実験 [9] では、かぶり厚さ 30mm 以下の場所において、降雨の影響により湿度が大きく変動することが示されており [2]、その例として、建物 Q のかぶり厚さ 10mm および 40mm の箇所における相対湿度の変動を図-6 に示す。同じ測定箇所については、10mm の場所のほうが、40mm の場所より相対湿度の変動が大きいことがわかる。従って、かぶり厚さが小さい場合、鉄筋近傍に乾湿繰り返し作用の影響を受ける可能性が高いと考えられている。乾湿繰り返し作用の環境下では、酸素と水分が供給されやすくなるため、鉄筋腐食が進行しやすいと考えられる。乾湿繰り返し作用の有無を確認するために、相対湿度の変動幅を考察する。

図-7 に湿度センサーの埋設深さと相対湿度変動幅の関係を示す。これより、雨掛かりのない屋内では、建物 M の 2 か所を除き、かぶり厚さが 30mm 以上あれば、変動幅がおおよそ 10% 以下に収まる。ただし、雨掛かりのない屋外において、相対湿度の変動幅は雨掛かりのある

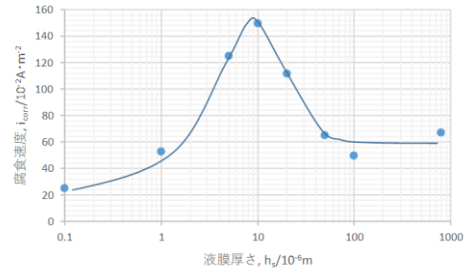


図-4 金属表面の水膜厚さと腐食速度の関係
(文献 [8] を基に作成)

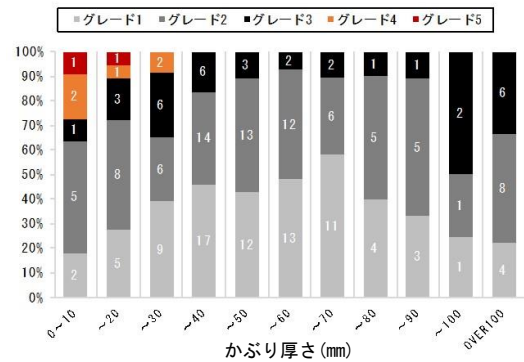


図-5 かぶり厚さごとの腐食グレードの発生頻度

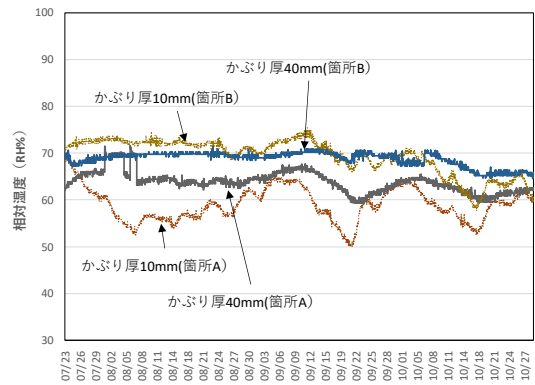


図-6 かぶり厚さ 10mm と 40mm における湿度変動

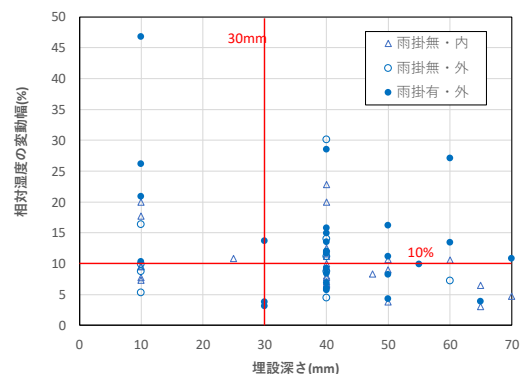


図-7 センサーの埋設深さと相対湿度変動幅の関係

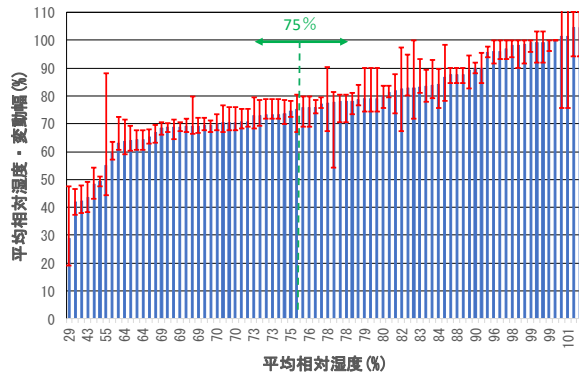


図-8 平均相対湿度とそれぞれの変動範囲

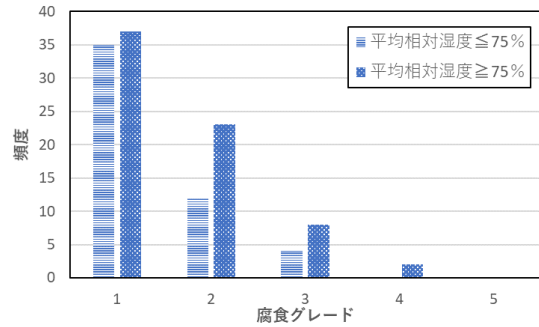


図-9 平均相対湿度 75%以上と以下の鉄筋腐食頻度

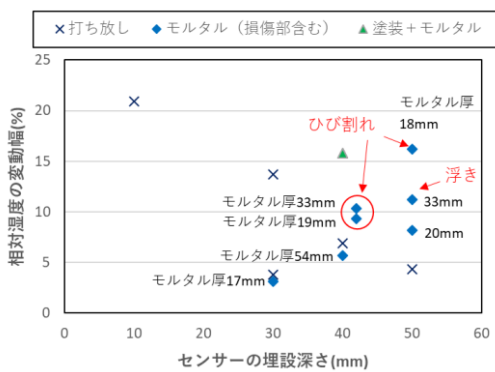


図-10 モルタル仕上と相対湿度の変動幅の関係

場所とほぼ同程度になる。また、雨掛かりの有無に関わらず、かぶり厚さが40mm以上あれば、屋外においても、相対湿度の変動幅が概ね20%以下に収まる。図-7の結果を踏まえ、湿度の変動が比較的安定している埋設深さ30mm以上の場所の平均相対湿度を昇順で図-8に示す。さらに平均相対湿度に加え、最大最小値も示す。図-8により、平均相対湿度が75%以下の場合、測定期間中相対湿度が80%を上回ることがほとんどない。従って、十分なかぶり厚さがある場合、平均相対湿度が75%以下であれば、鉄筋腐食が進行しやすい環境に当たらない可能性が有る。それを検証するために、かぶり厚さ30mm以上の箇所に対して、相対湿度75%を境に、各腐食グレードの発生頻度について図-9に示す。平均相対湿度75%以下の場合、グレード4以上の重度な鉄筋腐食が見られず、グレード2とグレード3の腐食頻度も平均相対湿度75%以上の場合より明らかに低いことが分かる。そのため、平均相対湿度はかぶり厚さに次いで、鉄筋腐食を評価する上で重要なパラメータだと考えられる。

4 仕上材に関する検討

4.1 センサーの埋め深さと相対湿度の変動幅

かぶり厚さ50mm以下かつ雨掛かりのある場所において、仕上材の水分侵入防止効果を評価するために、仕上

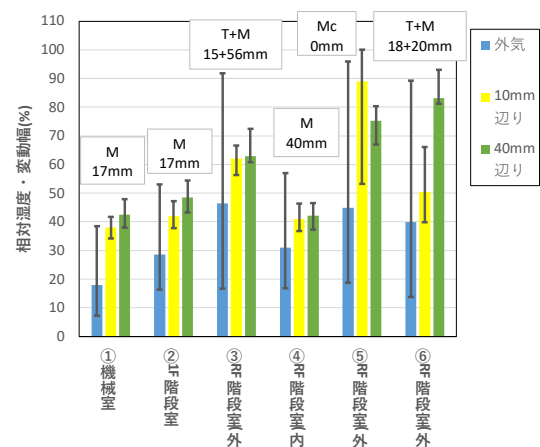


図-11 建物O：仕上材と平均相対湿度とその変動幅の関係

(測定期間：2018/12/10-2019/2/12)

(M：モルタル，T：タイル，Mc：複層塗材)

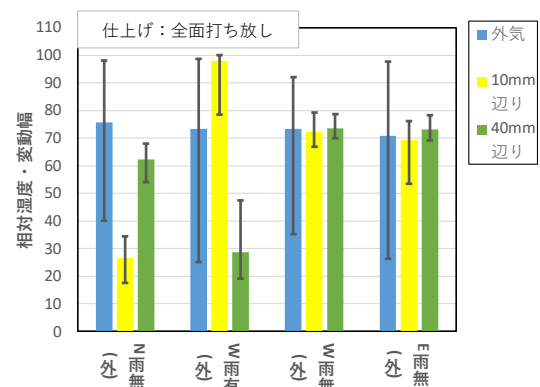


図-12 建物P：平均相対湿度とその変動幅の関係

(測定期間：2019/7/30-2019/10/14)

材(モルタル)の有無と相対湿度の変動幅の関係について図-10に示す。図-10により、コンクリート表面より埋設深さ30mmの場所では、打ち放しの箇所はモルタル仕上の箇所より変動幅がやや大きい。モルタルはその厚さによってはコンクリート内部の相対湿度の変動を抑える

ことが可能と考える。ただし、雨掛かりのある場所では、ひび割れや浮きなどの劣化が多く見られ、損傷がある場合は、打ち放しより相対湿度の幅が大きく、相対湿度の変動の抑制効果は明確ではない。

4.2 仕上げ材の厚さと相対湿度の変動幅

建物Oに対して、仕上げ材の相対湿度変動幅の抑制効果について図-11に示す。雨掛かりの無い室内(①②④)では、モルタル厚さ17mm(①, ②)における外気湿度変動幅に対するコンクリート内部の湿度変動幅は、深さ10mmの箇所でおおよそ0.25倍、40mmの箇所でおおよそ0.3倍であった。モルタル厚さ40mmにおいては、深さ10mmおよび40mmともに外気湿度変動幅の0.25倍程度であった。

一方、雨掛かりのある室外(③⑤⑥)では、タイル厚さ15mmにモルタル厚さ65mmが施された箇所③においては、深さ10mmおよび40mmの場所の相対湿度変動幅が外気の湿度変動幅のおおよそ0.15倍になり、タイル厚さ18mmにモルタル厚さ20mmが施された箇所⑥においては、深さ10mmと40mmの場所ではそれぞれ0.35、0.16倍であった。このことから仕上げ材の厚さがコンクリート内部の相対湿度変動幅に影響を及ぼすことが確認できた。複層塗材が用いられた箇所では、深さ10mmの場所の湿度変動幅が外気の0.6倍となっており、仕上げ材種類によっても変動幅抑制効果が異なることも確認できた。

図-12に建物Pの埋設深さ0mm(外気)、10mm、40mmそれぞれの平均相対湿度および湿度変動幅を示す。この建物の仕上げは全面打ち放しである。雨掛かりの無い箇所において、コンクリート内部の湿度変動幅は、深さ10mmで外気の湿度変動幅の0.2~0.3倍、40mmで0.15~0.25倍であった。一方、雨掛かりのある場所では、深さ10mmで0.3倍、深さ40mmで0.4倍となっており、雨掛かりがあることでコンクリート内部の湿度変動が大きくなる傾向が見られる。なお、図-12の倍率の値が、図-11の仕上げ材有りの場合とほぼ同等な値を示すが、調査期間および対象建物の所在環境が異なるため、この点についてはさらに調査データを集積してより総合的な検討を行いたい。

5 かぶり厚さ10mmの場所の湿度変動幅の予測

これまでの検討により、コンクリート表層部の相対湿度変動には、外気湿度、湿度変動幅、仕上げ材厚さの影響が大きいことが示唆された。そこでこれらの情報がおおよそ揃っている建物Oを対象として、湿度変動に関するパラメータを表-6に示す。コンクリート内部10mmにおける相対湿度変動幅を目的変数として、外気湿度、外気湿度変動幅、仕上げ厚さについて回帰分析を行った結果、かぶり10mmの場所における湿度の変動幅は式(1)で予測することができる。

$$f_{in} = 0.46 \cdot H_{out} + 1.43 \cdot f_{out} - 0.32 \cdot t - 11.24 \quad (1)$$

ただし、 f_{in} : かぶり10mmの場所の湿度変動幅

f_{out} : 外気湿度の変動幅

H_{out} : 外気の平均相対湿度

t : 仕上げ材の厚さ(種類を問わず)

式(1)で予測したかぶり厚さ10mmの場所の相対湿度の変動幅と実測値の関係は図-13に示す。それによって、予測値と実測値に相関が見られ、建物Oに対して、外気湿度の平均値および変動幅と仕上げ材の厚さで、かぶり厚さ10mmの場所での湿度の変動幅を予測することが可能と示唆される一方、まだ分析対象が少ないため、今後データ数を増やす必要がある。なお、分析結果は表-7に示す。建物Oの回帰分析結果により、かぶり厚さの小さい場所では、ある期間中のコンクリート内部の湿度変動幅は、外気の平均相対湿度および変動幅と仕上げ材の厚さで予測することが可能である。特に打ち放し構造物の場合、予測式を立てれば外気の湿度測定のみでコンクリ

表-6 建物Oの湿度変動に用いる変数

測定箇所	外気湿度 (RH%)	外気変動幅 (%)	仕上げ厚さ (mm)	かぶり10mmの湿度変動幅 (%)
1	17.9	31.1	17	7.7
2	28.6	36.8	17	9.5
3	46.4	75.1	71	10.3
4	30.9	40.1	40	9.6
5	44.9	77.1	0	46.8
6	40	75.4	38	26.2

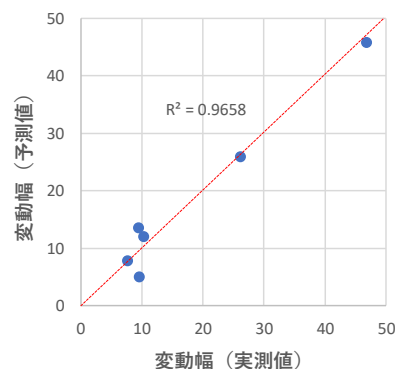


図-13 建物O:かぶり厚さ10mmの場所の相対湿度の変動幅

表-7 分析結果

観測数	6
決定係数R ²	0.9657682
自由度調整済決定係数	0.9144206
P値	0.0509057

ート表層部の湿度変動状況を把握することが可能であるため、コンクリート内部のセンサーの埋込数を減らせるとともに、測定にあたっての建物への損傷を低く抑えられると考えられる。

なお、本研究では特に後半部分ではかぶり厚 10mm 程度における湿度変動について検討を行った。建築基準法におけるかぶり厚さはこの領域を対象としたものではなく、本研究の知見は、文化財など、基準法などとは別の枠組みで保存を検討する建造物に対して将来的には適用を検討してゆくべきと考える。

6. まとめ

- (1) 調査結果および金属分野の知見から、鉄筋が腐食しやすい環境は鉄筋近傍の相対湿度が 70~90%の領域にある。
- (2) かぶり厚さが小さいほど、鉄筋腐食が顕在化し、調査結果により、かぶり厚さ 30mm 以上の場所では重度な(グレード 4 以上)の鉄筋腐食が発生しなかった。
- (3) かぶり厚さが小さいほど、相対湿度の変動幅が大きくなり、雨掛かりのない屋内環境では、かぶり厚さが 30mm 以上ある場合、相対湿度の変動幅がおおよそ 10%以下に収まる。
- (4) 温湿度センサーの埋設深さが 30mm 以上の場所では、平均相対湿度が 75%以下の場合、相対湿度の最大値が 80%を超えることがほとんどなく、腐食環境でないと考えられる。
- (5) 雨掛かりのあるかつひび割れや浮き等の劣化が認められる場合、仕上材の水分侵入防止効果については確認できなかった。
- (6) ある期間中のコンクリート内部の相対湿度の変動幅は、仕上げの厚さ、外気相対湿度の平均値および外気湿度の変動幅に影響される。

謝辞：

本研究は、日本建築学会・既存鉄筋コンクリート造建築物の構造・材料調査 WG（主査：野口貴文（東京大学））の活動の一環として行われたものであり、本研究における調査は全て建築物の管理者の了解を得て実施したものである。

また調査の多くは、東京大学野口研究室、東京理科大学兼松研究室・今本研究室、名城大学寺西研究室および芝浦工業大学濱崎研究室の学生諸君との協力の下に実施いたしました。その他、各位の多大なるご協力を得ました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- [1] 日本建築学会：建築工事指図書・同解説, JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2015.
- [2] 山田宗範, 今本啓一, 清原千鶴, 野口貴文, “実構造物におけるコンクリート内部の水分が鉄筋腐食に与える影響に関する研究,” コンクリート工学会年次論文集 vol.40 No.1, p.621-626, 2018.
- [3] 福島敏夫, 吉崎芳郎, 友澤史紀, 高橋幸一, “コンクリートの中酸化深さと炭酸化フロント深さとの関係-促進中性化試験, 屋外暴露試験, 実態調査, 理論的解析の結果からの考察,” コンクリート工学年次論文報告集 vol.19, No.1, 1997.
- [4] 佐藤 周之, 内田 健一朗, 横井 克則, 野中 資博, “フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術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, 2009.
- [5] 岸谷孝一, 櫻野紀元, “: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研,” コンクリート工学年次論文集 283号, 1979.
- [6] 公益財団法人日本コンクリート工学会, 既存コンクリート構造物の性能評価指標, pp.210, 2014.
- [7] H.Nagamo, T Doi and M. Yamashita: *Materials Science Forum, Vols. 289-292, , pp. pp.127-134, 1998.*
- [8] 石川雄一, “大気腐食データベースの構築(3.屋内大気腐食),” 第 63 回東京・第 64 回大阪スガウエザリング学術講演会 pp.3-15, 2016.
- [9] T. Ide, “Investigation of Shime Old Coal Mine Tower-Part 1 Result of the Cover Depth and Rebar Corrosion, and Humidity Change in Concrete,” *Summaries of Technical Papers of Annual Meetings, pp.807-808, 2019.*