

論文 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

山田 宗範^{*1}・今本 啓一^{*2}・清原 千鶴^{*3}・野口 貴文^{*4}

要旨：中性化が鉄筋まで到達していても鉄筋腐食が生じていない実例を踏まえ、鉄筋腐食進行の条件を把握することを目的とし、相対湿度、含水率、中性化および鉄筋腐食状況の調査を実施した。雨掛なしの箇所では、比較的乾燥し安定していたため鉄筋腐食は緩やかに進行する。雨掛ありの箇所では、乾湿繰り返しの影響を受け鉄筋腐食が活発となり、かぶり厚さが小さい箇所で顕著であった。本調査における鉄筋腐食進行の条件として、かぶり厚さが 30mm 以下かつ相対湿度が 80～90%RH の雨掛のある箇所と仮定した。また、微破壊によるかぶりコンクリートの含水率評価として比抵抗の測定を行い、含水率推定の可能性が示唆された。

キーワード：実構造物、鉄筋腐食、かぶり厚さ、相対湿度、中性化、比抵抗

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の長期供用が望まれており、そのため構造物の耐久性を適切に評価し、維持管理を行う手法を確立することが重要となっている。一般に、鉄筋コンクリート構造物の寿命は鉄筋腐食で評価されており、その評価指標として、コンクリートの中性化が鉄筋に到達した時期と定義されている¹⁾。一方で、近年の既往実構造物調査²⁾において、中性化が鉄筋に到達していても鉄筋腐食が生じていない実例が確認されており、鉄筋腐食に影響を及ぼすその他の要因も複合的に影響しているものと考えられる。

中性化が鉄筋に到達している実構造物中の鉄筋が腐食する主な要因として酸素および水が挙げられる。鉄筋腐食評価において、かぶりコンクリート部の含水率の把握が非常に重要であり、コア採取による含水率測定が行われている。しかし、コア採取による評価は一過性の含水状態に限られたものであり、降雨などによる乾湿繰り返しの影響が考慮されていない可能性がある。また、湿度環境により金属表面に生じる水膜厚さが異なり、水膜厚さは酸素の供給に影響を与え腐食速度に影響を与えるとする報告³⁾があり、既存鉄筋コンクリート構造物における鉄筋腐食評価に関しても、コンクリート内部の相対湿度の関係により鉄筋腐食速度について同様の検討ができる可能性がある。

そこで、本研究では、雨掛の有無およびかぶり厚さがコンクリート内部の湿度環境に与える影響について調査するため、鉄筋近傍に温湿度センサーを埋設し一定期間測定を実施した。測定により得られた平均相対湿度と中性化性状、かぶり厚さおよび鉄筋腐食グレードについて整理し、これらが鉄筋腐食の進行に与える影響について

検討を行った。また、非/微破壊によるかぶりコンクリート部の含水率評価を目的とし、比抵抗の測定を行い、相対質量含水率と相対湿度の関係について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 対象構造物

本研究の対象である 21 棟の調査構造物の築年数、階数、主な仕上げおよび所在地を表-1 に示す。また、K 競技場については高炉スラグ微粉末が使用されていた。屋内外、雨掛の有無、仕上げ材などを考慮し、任意の箇所について測定を行った。

表-1 対象建物概要

建物名	用途	竣工年 (調査時築年数)	階数	主な仕上げ	所在地
H倉庫	倉庫	1914 (100)	2	M	広島県
Z倉庫	倉庫	1918 (97)	2	U	東京都
K役場	庁舎	1926 (90)	2	M, P	岐阜県
Uアパート	住宅	1929 (84)	4	M, F, S	東京都
K小学校	学校	1935 (81)	3	U, M, F	東京都
R研究所	研究所	1935 (81)	2	M, P	東京都
N研究所	研究所	1937 (80)	2	M, P	東京都
K競技場	競技場	1958 (58)	5	U, M, F	東京都
S美術館	美術館	1959 (55)	3	U, M, F	東京都
M電波塔	電波塔	1962 (53)	2	M, F	茨城県
Nビル	事務所	1962 (54)	8	M, F	東京都
I電波塔	電波塔	1963 (52)	1	M, F	長野県
H団地	住宅	1965 (44)	4	U, M, P	東京都
A団地	住宅	1965 (44)	5	M, F	東京都
Kビル	事務所	1966 (51)	8	M, P	東京都
T学園	学校	1967 (50)	3	M, P	東京都
A大学	学校	1968 (47)	6	U, M, P	愛知県
R大学	学校	1968 (49)	2	U, M, P, T	千葉県
N団地	住宅	1970 (42)	7	M, F	東京都
T団地	住宅	1971 (43)	13	U, M, P	東京都
K電波塔	電波塔	1972 (44)	2	M, F	岐阜県

仕上げ種類 (U: 打放, M: モルタル, P: ペイント, F: 複層, T: タイル, S: しっくい)

*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 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学 工学系研究科建築学専攻教授 博士(工学) (正会員)

2.2 調査項目

(1) 中性化深さ測定

中性化深さは、φ80mmの湿式ビットを用いて採取したコアに、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した。仕上げ材を有するコアは、仕上げ部を取り除きコンクリート部の中性化深さを測定した。

(2) 含水率測定

含水率の測定は、中性化深さを測定した箇所の近傍を対象として実施した。含水率の算出は、仕上げ材表面からの含水率分布を測定するため、φ80mmの乾式ビットにて採取したコアを20mm程度に切断し質量法を用いて行った。切断したコアは、105℃乾燥炉により乾燥状態とし、その後十分に浸水し飽水状態とし、それぞれの質量を計測した。含水率の算出に用いた計算式を式(1)および式(2)に示す。ここで、相対質量含水率とはコンクリートが飽水状態時の水分量に対する調査実施時の含有水分量の比とする。

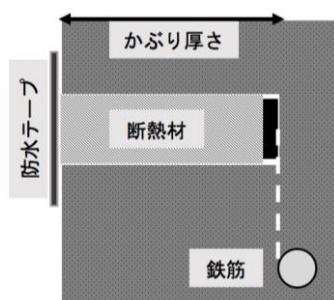
$$m_A = \frac{M - M_{\text{dry}}}{M_{\text{dry}}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$m_R = \frac{M - M_{\text{dry}}}{M_{\text{wet}} - M_{\text{dry}}} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

ここに、
 m_A : 質量含水率(%)
 m_R : 相対質量含水率(%)
 M : 105℃乾燥前質量(g)
 M_{dry} : 105℃乾燥後絶乾質量(g)
 M_{wet} : 浸水後飽水質量(g)

表－2 鉄筋の腐食区分

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 温湿度センサー埋設状況

(3) 鉄筋腐食状況

鉄筋腐食状況は、中性化および含水率の測定箇所近傍を対象とした。かぶり厚さは、コンクリート表層から鉄筋をはつり出しノギスを用いて計測した。この際、指針³⁾に準拠した表－2に示す鉄筋の腐食区分により鉄筋の腐食グレードを1から5の5段階で目視評価を行った。

(4) コンクリート内部の相対湿度

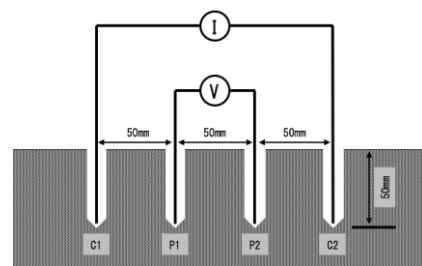
鉄筋腐食状況確認箇所の近傍において、振動ドリルφ26mmの振動ドリルでコンクリート表面から目的に応じた任意の深さまで穿孔し温湿度センサーを設置した。断熱処理は、孔に合わせて成形した断熱材にエポキシ樹脂系接着剤を塗布し孔内に充填させた。また、防水処理は防水アルミテープを用いて行った。埋設状況を図－1に示す。穿孔深さは、原則としてノギスにより測定したかぶり厚さとし、測定期間は短いもので2週間、長いもので4か月から6か月以内とした。測定期間中の相対湿度の平均値を求め、後述する検討に用いた。

(5) 比抵抗

四電極法（ドリル削孔）による比抵抗の測定は、微破壊によるコンクリート表層部の含水率の評価指標として実施した。比抵抗測定概要を図－2に示す。φ10mmの振動ドリルで深さ50mmまで穿孔し、電流電極C1、C2、電位電極P1、P2をa=50mm間隔で設置した。C1とC2間に電流Iを流した時のP1とP2間の電位差Vを測定し式(3)より算出した。深さ0mm、25mm、50mmの位置で測定を行い、測定範囲が鉄筋付近となる時の測定結果を検討に用いた。既往研究⁴⁾に基づき、測定間隔は50mmとし、比抵抗の測定範囲（深さ方向）はP1とP2の中電直下において電極の先端から測定間隔50mmに相当する深さまでの範囲とした。

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{V}{I} \quad \text{式(3)}$$

ここに、
 ρ : 比抵抗(Ω・m)
 a : 測定間隔(m)
 V : 電位差(V)
 I : 電流(A)



図－2 比抵抗測定概要

3. 調査結果および考察

以下に調査結果を示す。なお、調査対象構造物ごとに実施できなかった項目が存在し、考察に用いたデータの数にばらつきがあるため、以降において検討に用いたデータ数を参考として記載する。

3.1 鉄筋腐食状況

鉄筋腐食グレードの度数分布（全データ 232 件）を図-3 に示す。雨掛の有無および中性化が鉄筋まで到達しているか否かで整理した。図より、比較的重度の鉄筋腐食とされる腐食グレード 4 以上が雨掛ありの箇所において確認された。中性化が鉄筋まで到達していた箇所では、未到達の箇所と比較して鉄筋腐食グレード 4 以上の割合が増大した。一方で、雨掛なしの箇所においては中性化

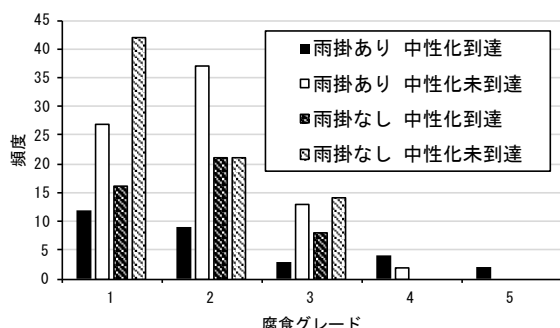


図-3 腐食グレード度数分布

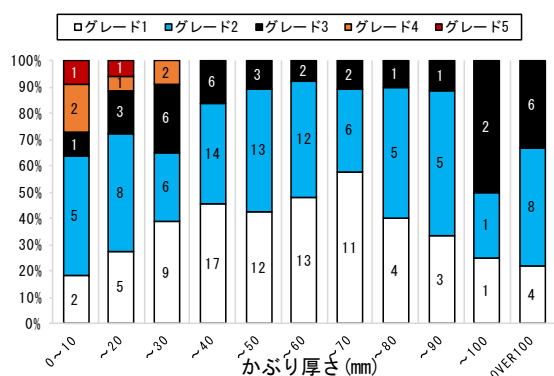


図-4 鉄筋腐食グレードとかぶり厚さの関係

の進行に依らず、腐食が比較的軽微とされる鉄筋腐食グレード 3 以下であった。実構造物において鉄筋腐食が活発となる条件として、雨掛のある箇所では中性化以外にもコンクリート内部の水環境が大きく関わっていると考えられる。

3.2 鉄筋腐食グレードと中性化残り、かぶり厚さ

鉄筋腐食グレードの割合とかぶり厚さ、中性化残りの関係（全データ 208 件）を図-4 および図-5 にそれぞれ示す。

図-4 より、断面欠損を伴い耐久性に影響を及ぼす可能性があると考えられる鉄筋腐食グレード 4 および 5 はかぶり厚さ 30mm 以下の範囲に限定された。また、かぶり厚さの増加に伴い耐久性に問題のない錆の中でもより軽度なグレード 1 の割合が増加する傾向がかぶり厚さ 70mm 以下の範囲で確認された。かぶり厚さの増加に伴い重度の鉄筋腐食が減少する傾向は、既往研究の結果⁵⁾と同様であり、かぶり厚さの増加により腐食の劣化因子が鉄筋近傍へ到達しにくくなり鉄筋腐食が抑制されたと考えられる。

図-5 より、グレード 5 は中性化が鉄筋に到達していたケースにのみ確認され、グレード 4 においても中性化残りが 10mm 以下の箇所でのみ確認された。中性化残りが減少するほど重度の鉄筋腐食が増加する傾向が見られた。図-4 および図-5 より、かぶり厚さが不足している箇所に

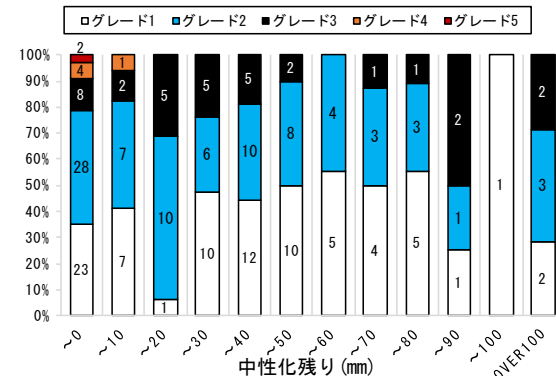


図-5 鉄筋腐食グレードと中性化残りの関係

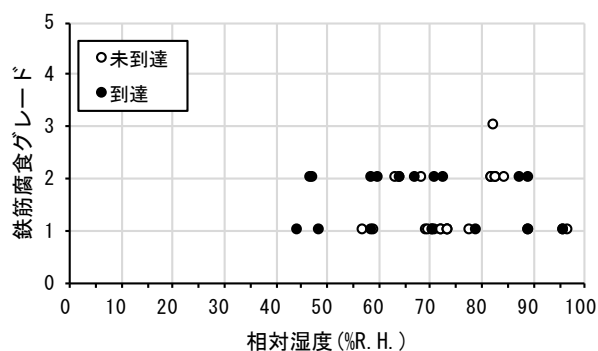


図-6 雨掛なし箇所における相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係

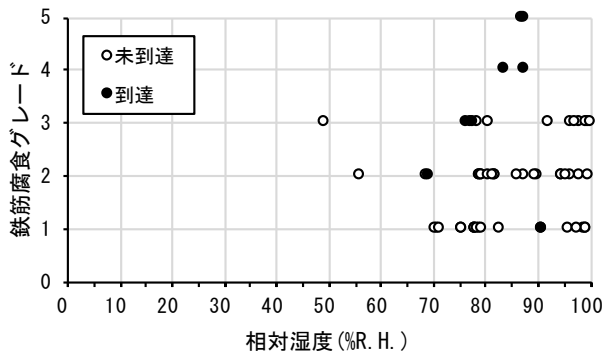


図-7 雨掛あり箇所における相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係

において二酸化炭素など外気の侵入による影響が鉄筋近傍まで及んでいることが示された。

3.3 コンクリート内部の相対湿度と腐食グレード

雨掛なし(中性化が鉄筋に到達：19件，未到達：38件)および雨掛あり(到達：10件，未到達：36件)の箇所における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を図-6および図-7にそれぞれ示す。なお，相対湿度の測定は2週間～6か月間実施し，測定期間内の平均値を示している。

図-6より，雨掛なしの箇所においては鉄筋腐食グレード3以下のみしか確認されなかった。中性化が鉄筋に到達している箇所と未到達の箇所いずれにおいても平均相対湿度との相関性はみられず，築50年付近の建築物を対象とした本調査において雨掛のない場所では鉄筋腐食の進行が緩やかであり，耐久性に影響を及ぼす可能性があるほどの鉄筋腐食は発生しにくいことを確認した。

図-7より，雨掛ありでは相対湿度が70%以上の箇所が増加し雨掛なしに比べ高湿環境であると考えられる。特に，中性化が鉄筋まで到達していた箇所，かつ相対湿度が80～90%の範囲では腐食グレード4以上が確認され比較的鉄筋腐食の進行が激しいと考えられる。雨掛なしと比較して，雨掛ありでは腐食グレード3以上の箇所が増加したものの相対湿度が80～90%の範囲外では全て耐久性に問題のないグレード3以下に収まっており，腐食の進行は緩やかであった。これにより，80～90%の相対湿度域において鉄筋腐食が進行しやすい環境条件である可能性が考えられる。

既往研究から引用した金属(Cu)における湿度条件と水膜厚さの関係⁹⁾および大気中における水膜厚さと腐食速度の関係⁷⁾を表-3および図-8にそれぞれ示す。表-3において，大気中の湿気による金属表面に生じる水膜はダストやさびなどが付着することで，微細な隙間や毛細凝縮により相対湿度が50%と比較的低い場合でも薄い水膜を形成し，相対湿度の増加に伴い水膜厚さも増加することが報告されている。また，図-8において水膜厚さと腐食速度の関係は，水膜厚さが10nmで鉄筋腐食速度が最大となり，この時の湿度環境は相対湿度80%とされている。それ以上水膜が厚くなるに従い，鉄筋表面への酸素の供給が遅くなり腐食速度が低下することも指摘されている。したがって，相対湿度が80%以下のコンクリートが比較的乾燥した環境では，含水率の低下によりコンクリート表層部の透気性が高まり，中性化が鉄筋まで到達した場合も水膜が薄いため鉄筋腐食は緩やかに進行すると思われる。また，相対湿度が90%以上では水膜が厚く形成されることにより，酸素の供給が遅く鉄筋腐食は緩やかに進行すると思われる。

以上の知見を踏まえ，雨掛ありの箇所における鉄筋腐

表-3 金属(Cu)表面における水膜厚さ

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

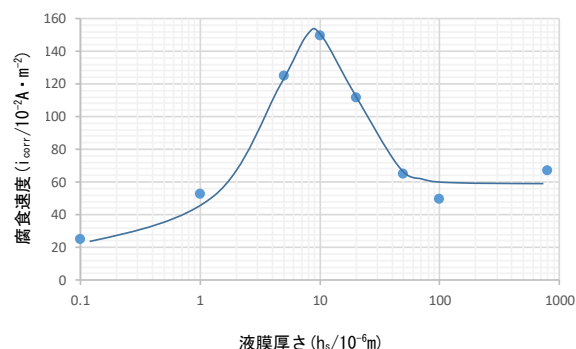


図-8 金属表面の水膜厚さと腐食速度の関係
(文献6)を基に作成)

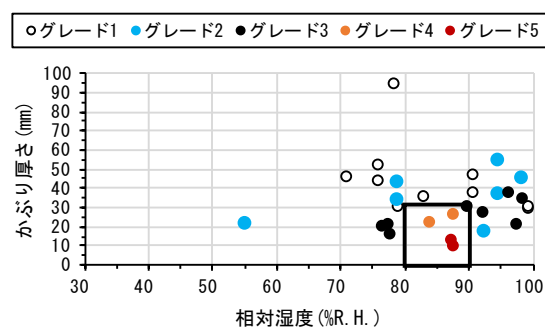


図-9 雨掛あり箇所における相対湿度と
かぶり厚さの関係

食グレードについて整理した相対湿度とかぶり厚さの関係を図-9に示す。本調査範囲内によると，かぶり厚さ30mm以下かつ相対湿度80～90%の範囲において鉄筋腐食グレードが高いものが集中している。そこで，ここでは図中黒太枠のかぶり厚さが30mm以下かつ相対湿度が80～90%において鉄筋腐食速度が高まる危険性がある条件として仮定した。

3.4 コンクリート内部の相対湿度の経時変化

屋内(雨掛なし)および屋外(雨掛あり)におけるコンクリート内部の相対湿度と温度の経時変化の例を図-10にそれぞれ示す。対象建物は表-1のH住宅で建物の諸元を表-4に示した。

屋内では，日射，外気の湿度および降雨の影響を受け難いことから相対湿度は60%付近で安定している。また，S美術館の屋内(雨掛なし)のかぶりコンクリートがな

表-4 建物概要

建物	内外	雨掛	仕上げ	鉄筋腐食 グレード	かぶり厚さ (mm)	中性化深さ (mm)	中性化残り (mm)	平均湿度	平均温度	観測日
H住宅	屋内	なし	打放	1	54	61.2	-7.24	58.5%RH	8.1℃	2013/12/14 ~2014/1/22 (38日間)
	屋外 南面	あり	吹付け モルタル	3	20	35.2	-15.2	89.6%RH	9.5℃	

い(かぶり厚さ 0mm)箇所においても同様に相対湿度 60%付近を推移し、鉄筋腐食は生じないことを確認した。

一方で、屋外では降雨などの影響を受け、比較的高い相対湿度(80~90%)で時間の経過とともに変動していた。以上のことから、屋外環境では屋内環境と比較して、鉄筋腐食の進行が比較적으로早くなる可能性が高いと考えられる。屋外においては、湿度環境を把握することが鉄筋腐食の進行度合いを推測する上で非常に重要であるが、相対湿度の変動が大きいことから平均値のみでなく長期的な変動を考慮した検討が必要であると考えられる。

3.5 仕上げ表面から深さ方向の相対湿度変化

仕上げ表面から深さ方向の相対湿度の変化について、R 大学外柱(雨掛あり)の仕上げが打放であった箇所において温湿度センサーを表面からの深さが 10mm, 30mm, 50mm の箇所にそれぞれ埋設し測定した結果および外気の湿度環境として気象庁千葉特別地域気象観測所における湿度と降水量の観測値を図-11 に示す。

図において、9/20 から 9/22 にかけての降雨の影響を受け外気の相対湿度が上昇している。まず、比較的に浅い深さ 10mm における相対湿度が上昇した後、深さ 30mm における相対湿度が上昇した。比較的に深い 50mm では相対湿度が安定している。つづいて、埋設深さが浅くなるにつれて変動が大きくなることを確認した。かぶり厚さがごく浅い場合、外部環境の影響を受けやすく乾湿を繰り返すことで乾燥時に中性化が進行し高湿時は水の供給を受けるため、鉄筋腐食が進行する条件が揃いやすいと考えられる。このことから、かぶり厚さが小さいほど相対湿度の変動に注意する必要がある。

3.6 鉄筋近傍の含水率評価方法の検討

前述のとおり、鉄筋腐食が進行する要因としてコンクリート内部の水分の影響が大きい。そのため、コンクリート内部の水分状態を非/微破壊で評価する方法を検討することは重要である。ここでは微破壊で鉄筋近傍の水分量の評価方法について検討を行った。

相対湿度と相対質量含水率の関係(全データ 33 件)を図-12 に示す。相対湿度が高くなるにつれて相対質量含水率も増加する傾向を示した。これにより、相対質量含水率を把握することで内部の相対湿度を推測する可能性が示唆された。

そこで、ドリル削孔法(四電極法)により比抵抗の測定

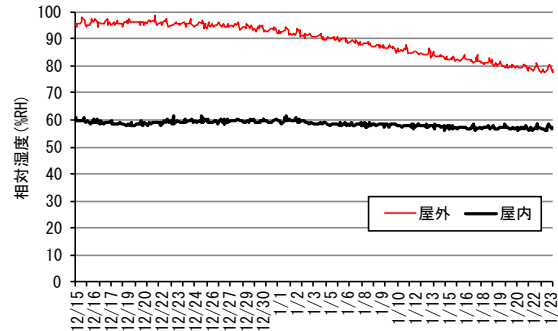


図-10 屋内外における相対湿度の経時変化

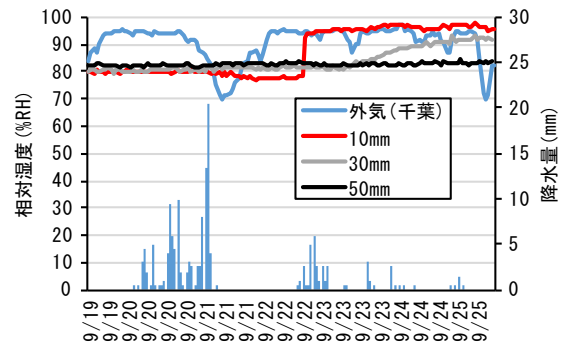


図-11 仕上げ表面から深さ方向の相対湿度の変化

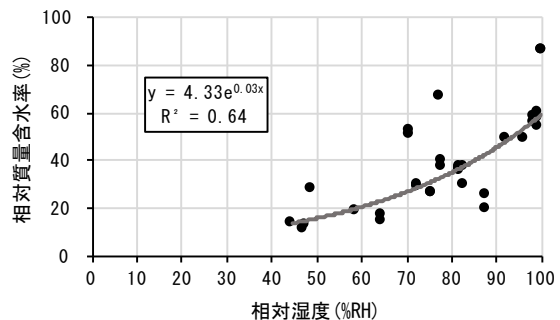


図-12 相対湿度と相対質量含水率の関係

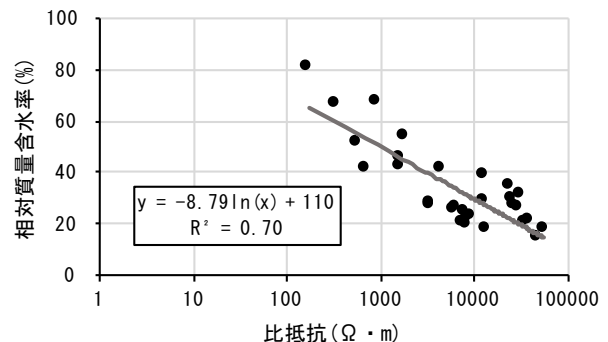


図-13 比抵抗と相対質量含水率の関係

を行った。比抵抗の算出には式(3)を用いた。比抵抗と相対質量含水率の関係(全データ 35 件)を図-13に示す。コンクリート内部の水分を介し電極間を電流が伝わるため、相対質量含水率が増加すると比抵抗は減少する傾向を示した。比抵抗と相対質量含水率の間には一定の相関性が確認されたことから、比抵抗より鉄筋近傍の相対湿度も推定できる可能性が考えられる。そこで、比抵抗と相対湿度の関係(全データ 27 件)について検討を行った。その結果を図-14に示す。比抵抗の増加に伴いばらつきが大きくなるが、比抵抗が低い範囲では一定の相関が見られた。対象構造物の築年数を 50 年程度に限定した近似式を図中近似式 B(全データ 9 件)に示す。図中近似式 A は築年数が 100 年程度の構造物を含んでいる。比抵抗の高域でばらつきが大きくなり相関が低かった近似式 A と比較して、近似式 B では高い相関が確認された。長期供用された構造物において、相対湿度は中性化やひび割れなどのコンクリート表層部の劣化による影響を受けている可能性がある。以上より、コンクリート表層の品質が健全であった場合、比抵抗が $1000\Omega \cdot m$ 以上であれば相対湿度は 80%RH 以下と推測され、鉄筋腐食の進行は緩やかであると考えられる。

今後も微破壊および非破壊による比抵抗のデータ収集を行い精度向上に向けて検討する予定である。

4. まとめ

本研究では、実構造物に関してコンクリート内部の相対湿度、中性化性状、含水率、鉄筋腐食状況の調査を実施し鉄筋腐食が耐久性に影響を及ぼす程度まで進行する条件について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) かぶり厚さが 30mm 以下かつ相対湿度が 80~90% の範囲において、鉄筋腐食の進行は最も活発となることが実構造物の調査結果から確認された。
- 2) 雨掛のない箇所において、相対湿度が安定しているため鉄筋腐食の進行は緩やかであり耐久性に影響を及ぼす程度の腐食は発生し難いと考えられる。
- 3) 雨掛がある箇所であつるかぶり厚さが小さい場合は特に乾湿繰り返しにより、鉄筋腐食が進行しやすい環境になるものと考えられる。
- 4) コンクリート表層部の比抵抗を測定することにより、コンクリート内部の含水率および相対湿度を推測する可能性が示唆された。
- 5) 本調査対象であった築年数 50 年程度の建物においては、比抵抗が $1000\Omega \cdot m$ 以上のとき相対湿度は 80%RH 以下となることを確認した。

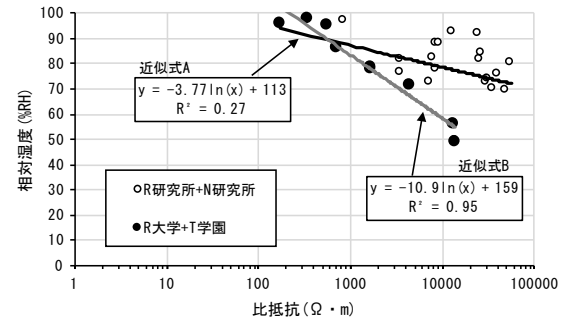


図-14 比抵抗と相対湿度の関係

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る。ここに記して感謝の意を表する。また、調査の実施および分析にあたり、芝浦工業大学・濱崎仁教授、東京理科大学・兼松学教授にご協力およびご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

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) 木野瀬透ほか：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，vol37，No.1，pp.601-606，2015
- 3) 公益社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 2014，p.210，2014
- 4) 下澤和幸ほか：かぶりコンクリートの鉄筋腐食抵抗性能評価のためのドリル PR 法の適用性の検討，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.646，pp.2145-2153，2009.12
- 5) 岸利治，横山勇気：中性化再考-かぶりコンクリートの剥落現象との相関について-，第 44 回 セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.19-22，2017.10
- 6) 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
- 7) H. Nagamo, T. Doi and M. Yamashita: Materials Science Forum, Vols. 289-292, pp.127-134, 1998