

5. 挿入式電気抵抗式水分計の測定値に及ぼす諸要因と含水率との関係

Factors Affecting Measurement Values of the Moisture Meter and Relationship with Moisture Content

加藤 猛*1 荒木 朗*1 山崎 順二*2

要 旨

本研究では、挿入式電気抵抗式水分計を用いてコンクリートの含水状態を評価する手法の適用性を検討した。既存建築物および試験体を対象に、水分計による測定値とコア供試体による質量含水率および飽和度を比較した。その結果、削孔時の摩擦熱や表層の欠けが測定値に影響を及ぼすことを明らかにし、削孔後 10 分以内かつ表面から 10 mm 以深での測定が有効であることを示した。また、カウント値は質量含水率よりも飽和度と高い相関を示し、空隙に対する水の占有割合を反映する指標であることを示した。さらに ASR や塩化物イオンの影響を受けるため、適用時には材料条件を考慮する必要がある。

キーワード：質量含水率／飽和度／カウント値／摩擦熱／ASR／塩化物イオン

1. はじめに

一般に鉄筋コンクリート構造体の耐久性能は、ASR や凍害などのコンクリート自体の劣化を除けば鉄筋腐食の程度によって判断される。鉄筋腐食は不動態皮膜が破壊された後、酸化還元反応に必要な酸素と水が鉄筋にバランスよく供給され、腐食電池が形成されることで進行する。このため、従来は不動態皮膜の破壊要因である塩化物イオンの浸透や中性化の進行を指標として耐久性能が評価されてきた。一方で、既往の研究により、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m^3 以上であっても含水率が 3.5 % 以下であれば鉄筋の腐食が生じていないことや中性化が鉄筋位置に到達した場合でも、水の供給がなければ、腐食が進行しにくいこと²⁾が報告されている。また、2022 年改訂の JASS 5³⁾では、一般劣化環境において、水の作用の有無により腐食環境と非腐食環境で分類されており、コンクリートの含水状態を評価する重要性が高まっている。

コンクリート中の含水状態は、乾式で採取したコア供試体を用い、JIS A 1476「建築建材の含水率測定方法」に基づいて自由水を直接的に測定することで評価される。しかし、コア供試体の採取は構造体への損傷や作業負担が大きく、適用範囲やサンプリング数に制約が生じる。このため、静電容量や電気抵抗を利用した非・微破壊試験により、含水率を間接的に評価する手法も提案されている。

本研究では、 $\phi 10 \text{ mm}$ 程度の小径孔で簡易に測定可能な挿入式電気抵抗式水分計に着目し、コンクリートの含水状態評価への適用性を検討する。複数の既存建築物や試験体を対象に、コア供試体による含水率と挿入式電気抵抗式水

分計による測定値を比較し、測定値に及ぼす影響要因を整理する。さらにそれらを考慮した測定条件のもとで、測定値とコンクリートの含水率との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 挿入式電気抵抗式水分計と試験の概要

2.1 挿入式電気抵抗式水分計の概要

挿入式電気抵抗式水分計（以下、水分計）は、 $\phi 10 \text{ mm}$ 、深さ 50 mm 、中心距離 50 mm で設けた 2 孔に対して、電気ブラシを挿入し、孔間のコンクリートの電気抵抗を測定する装置である。測定には、図-1 に示すように、毛材部分の寸法が $\phi 10.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ または $\phi 10.5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ の電気ブラシを用いた。

2.2 試験対象の概要

水分計による測定対象を表-1 に示す。実大 RC 試験体⁴⁾は柱、梁、壁および庇で構成される。G-NaCl は基準コンクリートに NaCl を 3 または 6 kg/m^3 混入した水 17 kg/m^3 を加えたものである。G-ASR は、基準コンクリートから 920 kg/m^3 の粗骨材を取り除いたモルタルにアルカリシリ

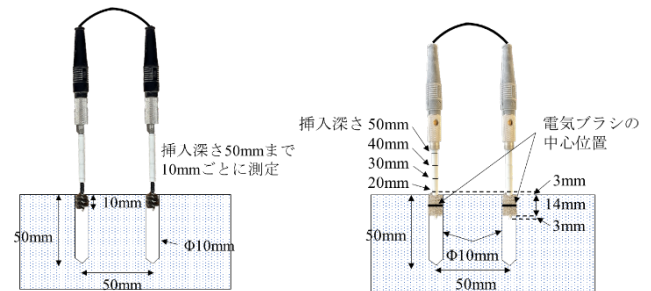


図-1 水分計に用いた電気ブラシの形状および寸法

*1 技術研究所建築材料研究グループ

*2 技術研究所

表-1 試験対象の概要

| 名称 | 記号 | 製造、竣工年 (試験時材齢) | コンクリートの備考 | 静置環境 | 試験面 | 雨掛かり | 用いた電気ブラシ |
|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------|------|--------------|--------------|----------------|
| 事業所 | PI | 1997 (28) | 不明 | 屋外 | 腰壁、複層 | あり | φ10.5 mm×10 mm |
| 実大 RC 試験体 ⁴⁾ | G-N | 2002 (22) | 24-18-20 N の基準コンクリート | 屋外 | 柱および壁 打放し | 柱、あり 壁、なし | φ10.5 mm×14 mm |
| | G-NaCl 6 | | G-N に NaCl を 3 kg/m ³ を添加 | | | | |
| | G-NaCl 3 | | G-N に NaCl を 6 kg/m ³ を添加 | | | | |
| | G-ASR | | G-N の粗骨材を ASR の骨材に置換 | | | | |
| 模擬壁 試験体 ^{5,6)} | W-1 ⁵⁾ | 2015 (10) | W/C=85,54,40 % | 屋内 | 打放し | なし | φ10.5 mm×10 mm |
| | W-2 ⁶⁾ | 2014 (11) | W/C=57 % | | 打放し、複層、リシン | | |
| 擁壁 | RW | 1978 (48) | 25.3 N/mm ² | 屋外 | 打放し | あり | φ10.5 mm×10 mm |
| 柱試験体 ⁷⁾ | Pi | 2017 (5) | 27-12-20 N | 屋外 | 打放し | あり | φ10.5 mm×14 mm |
| | | 2018 (4) | 36-12-20 N | | | | |
| RC 倉庫 ⁸⁾ | SR | 2004 (18) | 27-18-20 N | 屋外 | 壁、打放し | なし | φ10.5 mm×14 mm |
| | | 2007 (15) | 33-18-20 N | | | | |
| 物流倉庫 | WH | 1970 (53) | Fe=210 kg/cm ³ | 屋外 | 壁、複層 | あり | φ10.5 mm×14 mm |
| 集合住宅 | AB | 1981 (42) | Fe=225 kg/cm ³ | 屋外 | 腰壁、打放し | なし | φ10.5mm×14mm |

カ反応性粗骨材および NaOH 6.2 kg/m³ を添加したものである。また、表中の PI, RW, WH および AB は既存建築物を示す。

2.3 含水率の測定

コンクリート含水率は、外径 φ76 mm 以上のコア供試体を乾式で採取して測定した。コア供試体は、表面から 50 mm までを 10 mm 間隔、または 60 mm までを 20 mm 間隔で切断し、105 °C で乾燥させて絶乾質量を測定した後、式(1)により質量含水率を算出した。また、試験対象ごとに骨材の種類および単位量が異なるため、式(2)により相対質量含水率を算出した。飽水質量は試験片を水中に浸漬し、質量が恒量に達した値を用いた。相対質量含水率は、その個体が有する空隙に対する水の占有割合を示す指標であることから、本研究ではこれを飽和度と定義する。

質量含水率の測定は、表-1 の PI を除く試験対象に対して実施し、G-N, G-NaCl 6, G-NaCl 3 および G-ASR については 20 mm 間隔で切断した。飽和度は、G-N, G-NaCl 6, G-NaCl 3, G-ASR, W-1, W-2 および RW について算出した。

$$m_G = (M - M_d) / (M_d) \times 100 \quad (1)$$

$$m = (M - M_d) / (M_s - M_d) \times 100 \quad (2)$$

- ここに、
- m_G : 質量含水率 (%)
 - M : 切断後の質量 (g)
 - M_d : 絶乾質量 (g)
 - m : 相対質量含水率 (飽和度) (%)
 - M_s : 吸水後の飽水質量 (g)

3. カウント値に及ぼす諸要因

3.1 削孔時の摩擦熱による影響

PI を対象として、削孔後のカウント値の経時変化を測定した。測定孔は無養生とし、孔内は外気に解放された状態とした。測定時の平均気温は 2.5 °C であった。カウント値

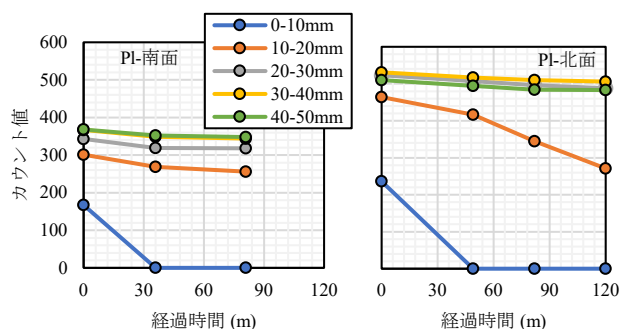


図-2 削孔後における深さごとのカウント値の経時変化

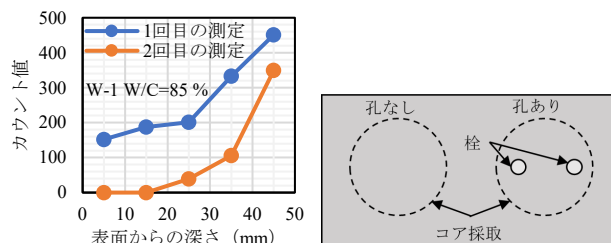


図-3 削孔後の経過時間によるカウント値の変化
図-4 コア供試体の採取位置の概要

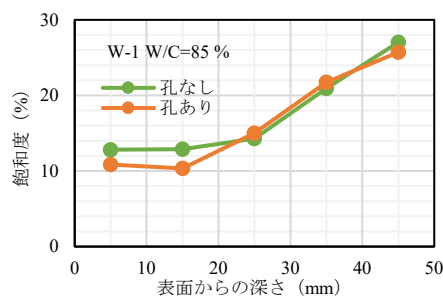


図-5 削孔の有無による深さ方向の飽和度の比較

の経時変化を図-2 に示す。カウント値が高いほど電気抵抗が小さいことを示し、図中の凡例は電気ブラシの毛材がコンクリートと接触する範囲を示している。

表層 (0-10 mm) のカウント値は、削孔直後には約 200

を示したが、経時的に低下し、約 50 分後には 0 となった。
 一方で、20-50 mm の範囲では、120 分経過後もカウント値に顕著な変化は認められなかった。

この要因が水分の逸散によるものか検証するため、W-1 (W/C=85%) において削孔直後および 5 時間以上経過後に再測定を行い、さらに孔の有無による飽和度を比較した (図-3~図-5)。その結果、表層付近で若干の差は認められるものの、20 mm 以深では飽和度に差は確認されなかった。したがって、削孔後の水分逸散がカウント値低下の主因である可能性は低い。

一方、コンクリートの電気抵抗は温度依存性を有し、温度上昇に伴い低下することが知られている^{9,10)}。図-6 に示すように削孔時にはビットとコンクリートの摩擦により熱が生じ、特に、深部で温度が高くなると考えられる。削孔後は外気との熱交換により表層から冷却されるため、温度低下は表層で大きく、深部で小さい。この温度分布の時間変化により、特に 0-20 mm においてカウント値が低下したものと判断される。

以上より、削孔時の摩擦熱に起因する温度変化は、主として表層から 20 mm 程度までの範囲に影響を及ぼす。また、削孔後 10 分以内の測定であれば、10-20mm のカウント値の変化は小さい。したがって、削孔後 10 分以内に、かつ表面から 10 mm 以深で測定を行うことで、温度の影響を低減できる。

3.2 削孔時の欠けおよび孔配置の影響

孔の中心距離がカウント値に及ぼす影響を検証するため、G-N、G-NaCl 6 および G-NaCl 3 を対象に、中心距離 40 mm および 50 mm で測定を行った。結果を図-7 に示す。なお、電気ブラシの毛材の長さが 14 mm あるため、その中心が 7, 20, 30 および 40 mm になるよう挿入した。つまり、毛材がコンクリートと接触する範囲は表面から 0-14, 13-27, 23-37 および 33-47 mm となる。また、電気ブラシとコンクリートの接触範囲を 0-14 mm と 13-27 mm 以深をまとめて 13-47 mm で示した。表層 (0-14 mm) ではばらつきが大きくなる傾向が認められた。一方、13-47 mm の範囲では中心距離 40 mm と 50 mm の結果は概ね一致し、1 対 1 の対応関係が得られた。表層におけるばらつきは、前節で示した温度影響に加え、削孔時に生じるコンクリートの欠けにより電気ブラシとの接触状態が不安定になること、および表層コンクリートの品質のばらつきが大きいことに起因すると考えられる。

以上より、中心間隔 40~50 mm の範囲では測定値への影響は小さいが、表層付近ではコンクリートの欠けや表層品質の違いに起因するばらつきが顕著となる。したがって、

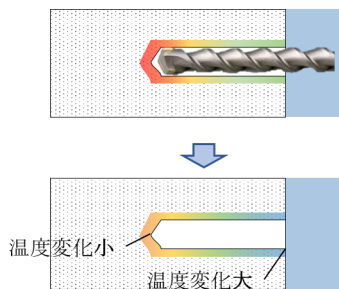


図-6 削孔時に生じる孔内温度分布の模式図

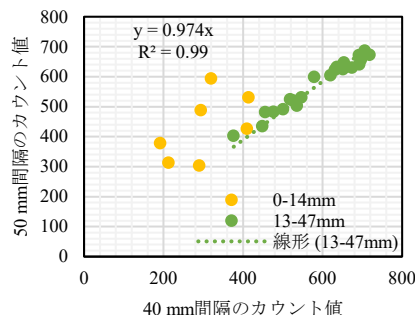


図-7 孔中心距離がカウント値に及ぼす影響

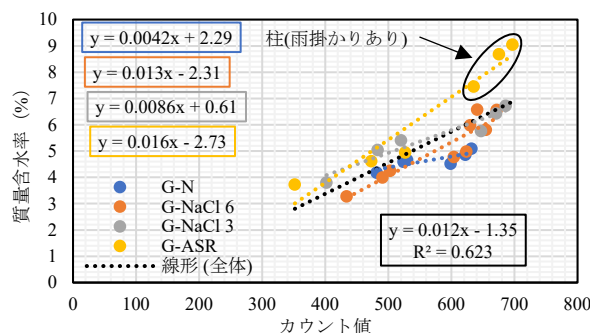


図-8 カウント値と質量含水率の関係

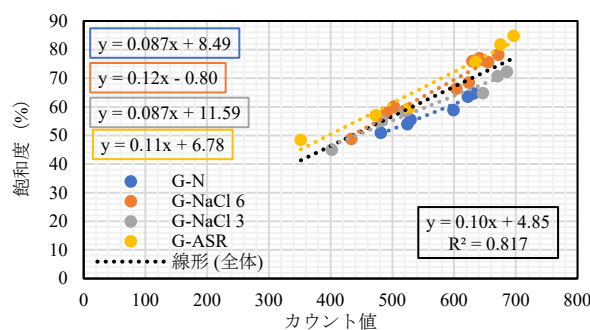


図-9 カウント値と飽和度の関係

以降の検討では、削孔後 10 分以内に測定し、かつ表面から 10 mm 以深のデータを用いることとした。

3.3 ASR の影響

実大 RC 試験体におけるカウント値と質量含水率および飽和度の関係を図-8 および図-9 に示す。

図-8 より、G-ASR の柱では、質量含水率が 7% 以上の高い値を示し、柱に主筋に沿ったひび割れが確認されている。

これは、ASR により生成されたシリカゲルが水を保持すること、および膨張圧によるひび割れを通じた水分供給の増加によるものと考えられる。一方、電気抵抗特性に関しては、ASR により抵抗が増加する傾向が報告されている¹¹⁾。このため、シリカゲル中の水は細孔溶液中の水とは異なる電氣的挙動を示し、水分計では十分に反映されない可能性がある。この結果、質量含水率に対してカウント値が相対的に低く測定され、ばらつきが増加したものと判断される。

図-9 では、質量含水率との関係とは異なり、G-ASR の柱は回帰線に近い位置で分布している。一見すると、G-ASR の柱におけるカウント値と飽和度は良好な関係であるが、前述のように水分計による測定は、シリカゲルが保持する水を十分に反映できない懸念点がある。そこで、G-N と G-ASR の全空隙率を式(3)により算出した結果を図-10 に示す。

$$p = 1 - (M_d - M_w) / (M_s - M_w) \times 100 \quad (3)$$

ここに、 p : 全空隙率 (%)

M_w : 水中質量 (g)

図-10 より、G-N と G-ASR の調査は、使用された粗骨材の種類が異なるが、各種材料の単位量は同一であったため、ASR が生じていない G-ASR 壁の全空隙率は G-N と同様であった。それに対し、G-ASR 柱の全空隙率は G-N より大きい。G-ASR 柱はシリカゲルが生成されたことにより、空隙率が増加していることが確認された。飽和度は空隙に対する水の割合であるため、空隙率の増加により見かけ上、カウント値と良好な対応関係が得られたものと解釈される。

以上より、ASR が生じたコンクリートでは、細孔溶液中とシリカゲル内の水の存在形態が変化するため、カウント値と含水率の検量関係を適用することは困難であり、個別に校正を行う必要がある。

3.4 塩化物イオンの影響

コンクリート中に塩化物イオン (以下、Cl⁻) が存在すると細孔溶液中のイオン濃度を増加させるため、電気抵抗を低下させる要因となる¹²⁾。したがって、G-NaCl 6 および G-NaCl 3 のカウント値は含水率に対して過大に測定されることが想定される。しかし、図-9 では、G-NaCl 6 および G-NaCl 3 の分布は G-N と比較して大きな差を示さず、むしろ僅かに低いカウント値を示した。このことから、本試験範囲においては、Cl⁻の影響は限定的であると判断される。

G-N および G-NaCl の壁からコア供試体を乾式で採取し、

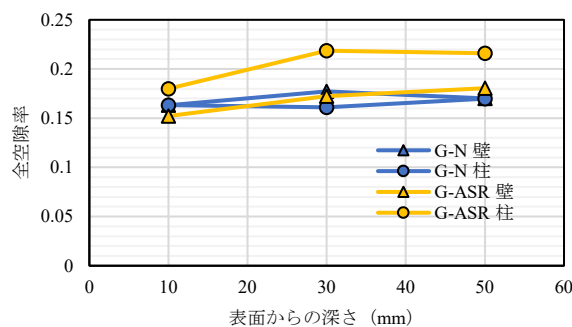


図-10 G-N および G-ASR における全空隙率の比較

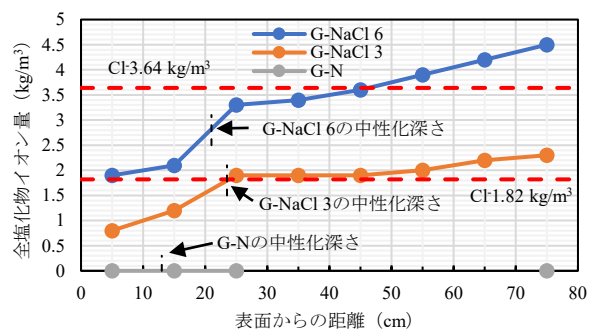


図-11 電位差滴定による塩化物イオンの深さ分布

電位差滴定を実施した結果を図-11 に示す。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおける Cl⁻は、中性化域では、全 Cl⁻のほとんどが可溶性 Cl⁻として存在し、未中性化域では、全 Cl⁻の約 48 % が可溶性 Cl⁻として存在することが示されている^{13, 14)}。そこで、G-NaCl 6、G-NaCl 3 において中性化域にある表面から 10-20 mm までの全 Cl⁻量を可溶性 Cl⁻量、未中性化域にある 20-30 mm から 40-50 mm までの全 Cl⁻量に 0.48 を乗じた値を可溶性 Cl⁻量とする。可溶性 Cl⁻量を推定した結果、表面から 50 mm までの平均値は G-NaCl 6 で 1.8 kg/m³、G-NaCl 3 で 0.9 kg/m³ と仮定される。この範囲では、水分計の測定値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

以上より、可溶性塩化物イオン量が概ね 1.8 kg/m³以下であれば、本手法による含水状態評価への影響は小さい。

4. カウント値と含水率の関係

第3章の検討により、カウント値は削孔時の摩擦熱による温度変化、表層におけるコンクリートの欠けによる電気ブラシとの接触状態、さらに ASR の影響を受けることが明らかとなった。そこで本章では、これらの影響を低減するため、削孔後 10 分以内に測定したデータのうち、表面から 10 mm 以深の測定値を対象とし、さらに ASR が生じた部材を除外して分析した。

これらの条件のもとで整理したカウント値と質量含水率の関係を図-12 に、飽和度との関係を図-13 に示す。図

中では、屋外に静置されているもの（以下、屋外静置）を円形、屋内に静置されているもの（以下、屋内静置）をひし形で示している。

図-12 より、カウント値が高いほど質量含水率は増加する傾向を示し、一定の相関関係が得られている。また、屋外静置と屋内静置を区別することで両者におけるカウント値と質量含水率との相関が向上したことがわかる。図-13 に示す飽和度との関係では、質量含水率との関係と比較して、より高い相関が得られた。特に屋内静置においては、カウント値と飽和度の決定係数が高く、両者の関係が明瞭である。この結果から、カウント値はコンクリート中の水分量そのものではなく、空隙に対する水の占有割合、すなわち飽和度を反映する指標であると解釈される。

一方、既往研究¹⁵⁾においては、図-14 に示すようにカウント値は質量含水率が約4%以上であれば、孔内温度による影響をほとんど受けないが、質量含水率が低いほど、孔内温度の影響を受けていることがわかる。本研究においても、屋内静置の質量含水率は概ね3%未満であり、そのカウント値は屋外静置より高い値を示した。孔内温度の測定を実施していないが、これは図-6 に示したように削孔時の摩擦熱により孔内温度が上昇し、電気抵抗が低下した結果、カウント値が過大に測定されたためと判断される。

以上より、カウント値は、コンクリートの飽和度と良好な相関を有し、空隙中の水の占有割合を評価する指標として有効であることが示された。ただし、コンクリートの含水率が低い領域では、温度の影響を受けやすく、また、CI や ASR などの材料条件によってもカウント値が変動する可能性がある。したがって本手法を適用する際には、測定条件および対象コンクリートの特性を考慮した上で評価を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、複数の既存建築物や試験体を対象として、挿入式電気抵抗式水分計によるカウント値とコア供試体による含水率を比較し、カウント値に及ぼす影響要因および含水率との関係について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 表層付近（0～10 mm）では、削孔時の摩擦熱による温度変化およびコンクリートの欠けに起因する電気ブラシとの接触不良により、カウント値にばらつきが生じる。
- (2) 削孔による温度影響は主に表面から 20 mm 程度までに及ぶが、削孔後 10 分以内に、かつ表面から 10 mm 以深で測定を行うことで、その影響を低減できる。

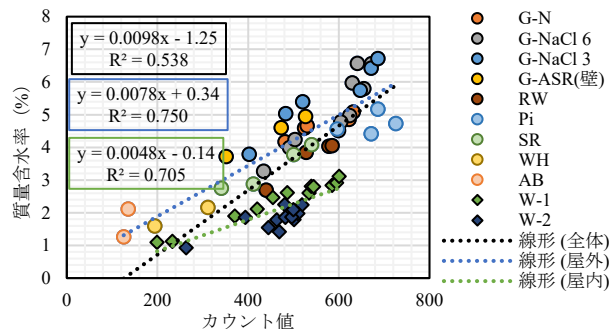


図-12 カウント値と質量含水率の関係（測定条件：削孔後 10 分以内、深さ 10mm 以深、G-ASR 柱除外）

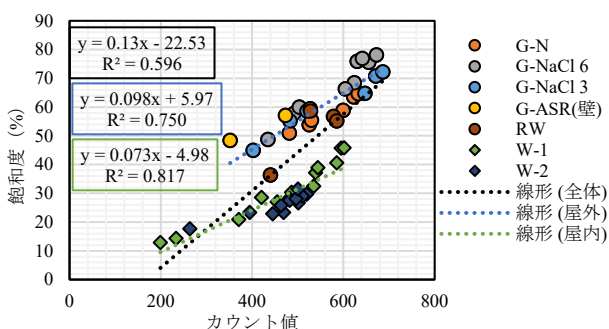


図-13 カウント値と飽和度との関係（測定条件：削孔後 10 分以内、深さ 10mm 以深、G-ASR 柱除外）

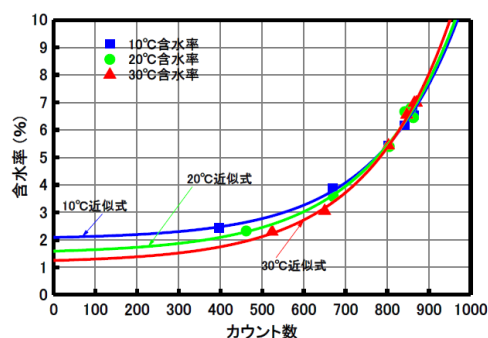


図-14 孔内温度がカウント値と質量含水率の関係に及ぼす影響¹⁵⁾

- (3) ASR が生じたコンクリートにおいて、シリカゲルが保持する水の影響により、カウント値では含水率の評価が困難となる。
- (4) 可溶性塩化物イオン量が概ね 1.8 kg/m³ 以下の範囲では、カウント値に及ぼす影響は小さい。
- (5) カウント値は質量含水率よりも飽和度と良好な相関を示し、コンクリート中の空隙に対する水の占有割合を反映する指標である。

以上より、挿入式電気抵抗式水分計は、適切な測定条件のもとで、コンクリートの含水状態を評価する有効な手法であることを示した。ただし、低含水領域における温度影響や、ASR および塩化物イオンの影響を考慮する必要がある。

ある。今後は、各種劣化要因および環境条件を考慮した検量関係の一般化を図る必要がある。

[参考文献]

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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 2022
- 4) 下澤和幸ほか: 材齢 22 年屋外暴露された RC 実大壁試験体を対象とした各種非破壊試験 その 1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.47-48, 2025.9
- 5) 山崎順二ほか: 実大コンクリート壁における各種の透気性試験に関する共通試験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.746, pp.515-525, 2018.4
- 6) 清原千鶴ほか: 表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究 その 1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.359-360, 2015.9
- 7) 齊藤雅仁ほか: コンクリート柱部材の透気性に及ぼす配合および養生方法の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, pp.266-271, 2019
- 8) 下澤和幸ほか: 既存 RC 構造物の表層品質評価に向けた透気性と含水率に関する共通試験 その 1. 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.185-186, 2023.9
- 9) 佐藤道生ほか: 比抵抗に着目したコンクリートの長期耐久性モニタリング, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.785-790, 2011
- 10) 三坂岳広ほか: 直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を及ぼす測定方法および計測条件の検討, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1297-1302, 2015
- 11) 櫛田淳二ほか: 塩害と ASR の複合劣化機構と電気化学的補修に関する検討, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.988-993, 2012
- 12) 榎原彩野ほか: 電気抵抗率による物質透過性評価に及ぼすイオン濃度の影響, 土木学会第 65 回年次学術講演会, Vol.5, pp.349-350, 2010
- 13) 石田雅博ほか: 中性化したコンクリートの塩分浸透に関する検討-屋外暴露試験及び塩水浸漬試験-, 土木研究所資料第 4397 号, 2020.3
- 14) 田中秀治ほか: 各種セメントを用いたモルタルの塩化物イオン固定量に関する研究, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.843-848, 2004
- 15) 大田孝二ほか: 道路橋 RC 床版の損傷と含水率, 第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集 土木学会, pp.49-54, 2014