

報告 異なる環境条件が中性化進行に与える影響とその診断法の検討

Effect of carbonation in different environmental condition
and investigation of diagnosis method

○本名 英理香*1・阿久津 裕則*2・氏原 菜摘*2・伊代田 岳史*3・濱崎 仁*4
Erika Honna, Hironori Akutsu, Natsumi Uzihara, Takeshi Iyoda and Hitoshi Hamasaki

要旨：コンクリート構造物の劣化の一つである中性化は、pH 低下により起こる現象であるが、これは使用した材料条件の他に、外気の二酸化炭素濃度や相対湿度といった環境条件の影響を大きく受ける。本研究では中性化深さに環境条件が与える影響を整理するために、高炉セメントを用いて建設されたコンクリート構造物を対象に、中性化深さと含水率の測定を行った。その結果、中性化進行と含水率の相関性が認められた。

キーワード：実構造物、コンクリート、中性化、含水率

1. はじめに

コンクリートの中性化の要因の一つである二酸化炭素は、コンクリート中の空隙を介して侵入すると、細孔溶液に溶解し炭酸 (H_2CO_3) となり水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) や C-S-H といった水和生成物と反応し炭酸塩を生じさせて、コンクリート中の pH を低下させる。

従って、中性化進行には水分が必要不可欠である。一方で、コンクリート中の空隙は、コンクリートが置かれている環境中の湿度とバランスして液状水として内部を満たされ、空隙中の水分は進入してくる二酸化炭素の移動を助け、中性化速度を著しく下げる役割を持つ。そのためコンクリートの中性化抵抗性はコンクリート内部の乾燥程度が大きく関係する。コンクリートの中性化速度とコンクリートの乾燥程度との関係は、相対湿度を用いて中性化速度係数として評価されている例がある¹⁾。しかし実構造物において相対湿度が同様な環境においても、コンクリートの含水率は施工条件や温度などにより異なるため、コンクリート構造物の中性化速度係数を評価するには、コンクリートの含水率を考慮することが適切であると考えられる。

本研究では中性化深さに環境条件が与える影響を整理するために、高炉セメントを用いて建設されコンクリート構造物を対象に、中性化深さと含水率の測定を行った。中性化深さはドリル削孔法とコア採取によって測定し、ドリル削孔法の妥当性を検証した。また、含水率は現地での静電容量法とドリル削孔後の電気抵

抗法によって測定した。測定箇所は環境条件が異なる、屋内外で雨掛かりの有無を考慮して選出した。

2. 実験概要

2.1 測定場所

高炉セメントを用いて建設され、供用から 56 年経過したコンクリート構造物を対象に各種測定を実施した。測定場所は、屋内、屋外雨掛りあり (屋外 (雨))、屋外雨掛りなし (屋外) の 3 つの環境に分類し、表-1 に示すように含水率測定と中性化深さ測定を行った。測定箇所はそれぞれの試験において、同部材でできる限

表-1 各試験における測定箇所数

	測定箇所数		
	含水量測定 総数	中性化測定総数	
		ドリル削孔 (中性化深さ:0mm)	コア (中性化深さ:0mm)
屋内	8	3	6(1)
屋外(雨)	7	7(3)	7(4)
屋外	10	9	10(1)

り近い位置で行うようにした。

2.2 中性化深さ測定

(1) ドリル削孔法

試験は NDIS 3419 (ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法) に準じて行った。測定箇所 1 箇所につき 3 つの削孔を行い、その平均を中性化深さとした。仕上材がある箇所については、表面からの削孔深さによって測定し、同一箇所採取したコア試料の仕上材厚さを差し引いて中性化深さとし

*1 芝浦工業大学 大学院理工学研究科 建設工学専攻 Div. of Architecture and Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

*2 元芝浦工業大学 建築学科 One-time Dept. of Architecture, Shibaura Institute of Technology

*3 芝浦工業大学 土木工学科 Dept. of Civil Engineering, Shibaura Institute of Technology

*4 芝浦工業大学 建築学科

Technology

Dept. of Architecture, Shibaura Institute of Technology

た。

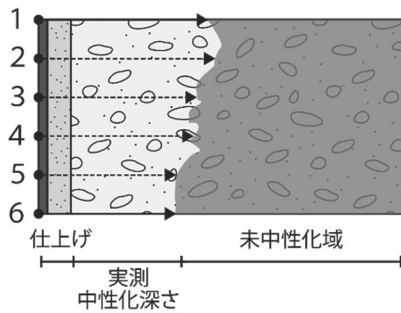


図-1 割裂中性化深さ測定位置

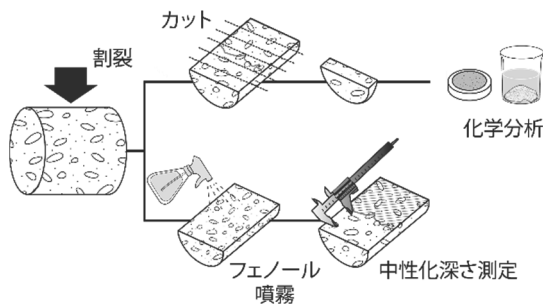


図-2 採取コアの試験フロー

(2) フェノールフタレイン法

中性化深さ試験は JIS A 1152 に準拠して行った。湿式にて $\phi 75\text{mm}$ にて採取したコンクリート供試体を割裂して用いた。中性化深さの測定は、図-1 に示すように供試体の仕上げ厚を除いた、コンクリートのみの中性化域までの深さを、直径方向を 6 等分した箇所から測定した。本試験では既往の研究²⁾を参考に、噴霧 1 日後の中性化深さを各供試体における中性化深さとした。

(3) pH 測定

深さ方向の中性化の進行を確認するために、深さ方向の pH の変化を、pH メーターを用いて測定した。試料は、図-2 に示すように、採取したコアの割裂後のフェノールフタレイン溶液を噴霧していない試験片を用いて、深さ方向に 19mm ごとにカットし、骨材を含んだまま 0.15mm のふるいを全通するまで微粉碎したものを用いた。水溶液への抽出は、微粉碎した粉末 20g を 50°C の水で 30 分間しんとうさせ、その後浸透液をろ過し、200ml に定容した。

(4) 炭酸カルシウムの定性分析

深さ方向の生成物の変化を確認するために、粉末 X 線回折装置を用いて、炭酸カルシウムのうち Vaterite と Calcite の定性分析を行った。試料には pH 測定に用いたものと同様のコアを用いて、骨材をできる限り取り除いたものを使用した。各生成量を比較するために、

内部標準試料として Al_2O_3 を試料の 10% 置換した。



図-3 含水率測定器

2.3 含水率測定

(1) 電気抵抗法

電気抵抗法は、コンクリートに含まれる水分の量に対応してコンクリートの電気的性質が変化することを利用して、電極間の抵抗を測定し、コンクリート中の含水量を求める方法である。本研究では、図-3 の左側に示す装置を用いて、1 箇所につき 3 つの削孔を行い 2 組のデータを採取しその平均を測定値とした。測定は、一対の電極をコンクリート内に 10mm ずつ差し込み、その度に測定値を読み取った。測定深さは 0-105mm 間で、表層のみ 15mm、以後は 10mm 間隔とした。装置の仕様により一定以下の含水率は表示されないため、その場合は装置に表示されるカウント値を用い、あらかじめ求めておいたカウント値と含水率の関係に外装することによって含水率を推定した。

(2) 静電容量法

静電容量法は、硬化コンクリートの含水状態の程度を大まかに評価する目的で、コンクリート表面に押しつけた電極の静電容量から相対的に評価する方法である。本調査では、図-3 の右側に示す装置を用いて、躯体表面に水分検出部を押しあて、直接含水率を読み取った。

3. 実験結果

3.1 中性化深さ

図-4 にドリル削孔法とコア割裂面での中性化深さを示す。どちらの中性化深さも仕上げ厚さを除いた値となっている。グラフ内の白抜き記号はコア割裂における中性化深さ 0mm の結果である。直線はドリル削孔法とコア割裂による中性化深さが 1:1 のときを表している。環境条件に関係なく、ドリル削孔法とコア割裂による中性化深さはよい相関を示した。ただし、中性化深さが浅い箇所ではドリル削孔法による結果のほう

が大きい値を示す傾向にあった。

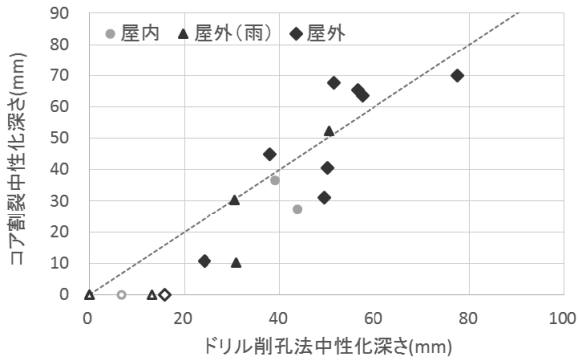


図-4 ドリル削孔法とコア割裂による中性化深さ

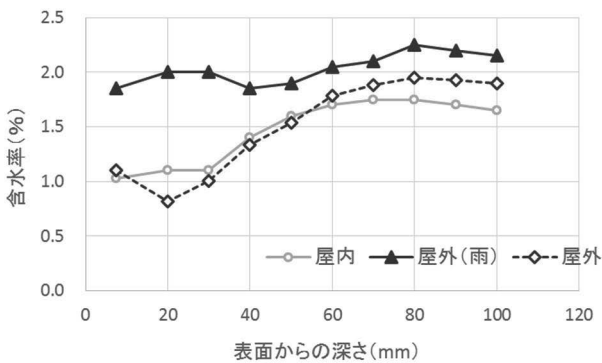


図-5 電気抵抗法による含水率測定結果

環境別の中性化進行に着目すると、屋外において、雨掛りのない環境のほうが、雨掛りのある環境に比べて、中性化深さが深い場所がいくつか見られた。これは、屋外では気象変動により表層部の乾湿繰り返しが起こりやすく、さらに雨掛りのない箇所では水分供給がないことから乾燥状態となり、CO₂が浸透しやすい状態にあったためと考えられる。

3.2 含水率

図-5に電気抵抗法より求めた、表面からの深さごとの含水率の一例を示す。値は2点計測した結果の平均値となっている。環境条件に関わらず、表層面よりも躯体内部にいくほど含水率が高い値を示した。しかし、直接的な雨掛りがある箇所では表層部と躯体内部の含水率の差は他の環境と比べ小さく、また全体的に高い値を示した。これは降雨により、外部からの水分の供給が定期的にあったためであると考えられる。

図-6に表層部(0-15mm)の電気抵抗法と静電容量法により求めた含水率を示す。静電容量法は仕上げが施されている箇所での測定が行えないため、グラフのデータは打放し、あるいはモルタル仕上げの箇所の結果のみとなっている。環境条件に関わらず、電気抵抗法と静電容量法はよい相関を示した。ただし、静電容量法における含水率のほうが電気抵抗法のそれより大きな値を示す傾向にあった。今回の調査では、測定対象の

ほとんどにおいて仕上げが施されており、静電容量法

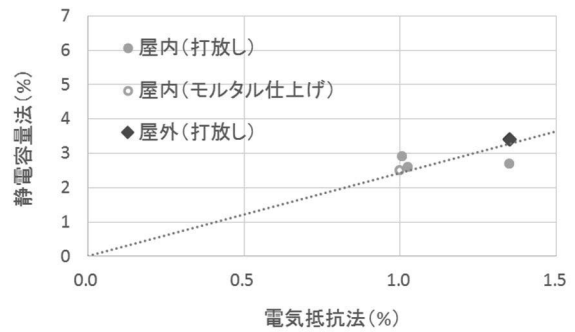


図-6 電気抵抗法および静電容量法による含水率

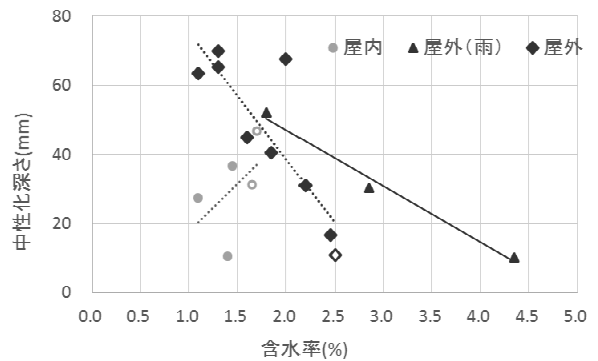


図-7 中性化深さと含水率の関係

が適応できなかったことから、静電容量法によるコンクリート構造物の含水率測定は不向きであると考えられる。

3.3 含水率と中性化深さの関係

図-7に測定箇所別の割裂後のフェノールフタレイン法によって求めた中性化深さと電気抵抗法によって求めた深さ95-105mm(未中性化域)における含水率を示す。これより、中性化前の含水状態が中性化進行に与える影響の検討を行った。グラフにおける白抜き記号は仕上げの施されていない、コンクリート打放しの箇所の結果である。また、中性化深さが0mmの中性化が生じていない箇所の結果は除いてある。屋外においては雨掛りの有無に関わらず、中性化深さと含水率の間に相関関係があり、含水率が高いほど中性化は抑制された。一方で屋内では、含水率にあまり差が生じないため、コンクリートの品質などの他の要因の影響が大きく表れたと思われる。本研究の範囲では、仕上げ材の有無は含水率に比べ、中性化深さへはあまり影響を与えない結果となった。今回調査を行った箇所の仕上げ材は改修された後のものであり、それ以前の仕上げ材の有無や仕様の影響を受けていることも要因として考えられる。

3.4 深さ方向の検討

深さ方向の中性化による変化を確認するために、コアを用いた化学分析を行い、非破壊試験による結果と

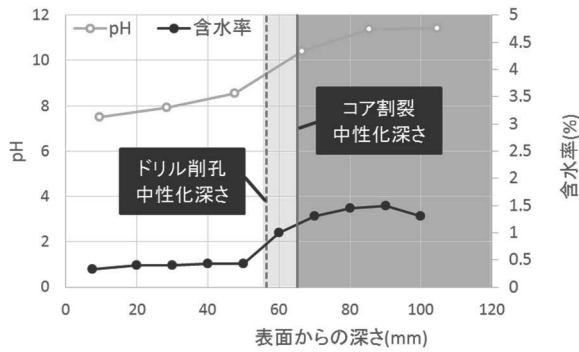


図-8 深さ方向の pH と含水率の変化

比較を行った。図-8に表面からの深さ方向での、pHと含水率の変化を示した。グラフ内の縦線はドリル削孔法とコア割裂によって求めた中性化深さを表しており、ドリル削孔法では、56.4mm、コア割裂では65.2mmとなっている。pHは表面からの深さ47.5-85.5mmにかけて高くなる傾向を示した。また、含水率は深さ50-80mmにかけて増加傾向にあり、これはpHの変化領域内にあった。中性化深さと比較をすると、ドリル削孔とコア割裂のどちらの中性化深さもpHと含水率の変化領域にあった。炭酸化反応では反応熱による温度上昇により、反応の媒体として用いた水分が蒸発する³⁾との報告もあり、中性化域ではコンクリート内の自由水が炭酸化反応により蒸発して、含水率が減少したとも考えられる。

図-9に深さ方向の炭酸カルシウムの生成量と含水率の変化を示す。炭酸カルシウムの生成量は、X線回折より求めた積分強度を内部標準試料の積分強度で除した値となっている。含水率が低い表面から深さ50mmにおいてVateriteの生成が確認できた。VateriteはCa/Si比の低いC-S-Hやモノサルフェートから生成される⁴⁾と報告されている。高炉スラグ微粉末を用いた場合、Ca/Si比の低いC-S-Hが生成されるためにVateriteが生

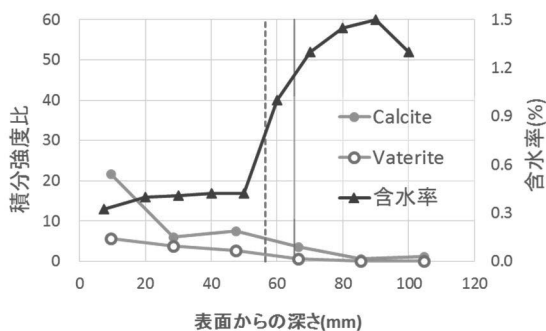


図-9 深さ方向の炭酸化生成物と含水率の変化

成されたと考えられる。一方でCalciteは、含水率の変

化には関係なく、表層面において21.6と高い値を示した。これは、細孔溶液中の水酸化カルシウムが表層に溶出してきて、それが炭酸化したために表層部だけ突出してCalciteが検出され、それと同時に水酸化カルシウムの溶液となった水は炭酸化による反応熱で蒸発したと考えられる。コア割裂による未中性化領域(>65.2mm)においても微量であるがCalciteの生成が確認された。よって、フェノールフタレイン溶液による中性化診断は簡易的にはできるが、実際には未中性化領域と判定された深さにおいても炭酸化が生じている可能性があることがわかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリート構造物では環境条件に関係なく、躯体内部に比べて表層部のほうが含水率は低い。
- (2) 屋外環境で雨掛りがある環境では、深さ方向への含水率変化がほかの環境と比べてなだらかであった。
- (3) 静電容量法による含水率測定は電気抵抗法よりも高い値を示した。
- (4) ドリル削孔法による中性化深さ測定は、採取コア割裂面におけるフェノールフタレイン噴霧による結果と同様な傾向を示した。
- (5) 中性化深さと電気抵抗法により求めた含水率は、中性化深さ0mmを除き、含水率が高いほど中性化しにくいという相関関係が認められた。
- (6) 表面からの深さ方向の変化で見ると、中性化域では含水率が低い結果となった。
- (7) フェノールフタレイン噴霧により未中性化域と判定されても、炭酸カルシウムの生成は確認された。

参考文献

- 1) 安部道彦, 榊田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志ら: コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第409号, pp.1-10, 1990
- 2) 本名英理香, 氏原菜摘, 伊代田岳史, 濱崎仁: 地中環境におけるコンクリートの中性化抑制効果の検討, セメント技術大会講演要旨, pp.218-219, 2015
- 3) 坂井悦郎: わかりやすいセメント科学, セメント協会, pp.105-112, 1993.3
- 4) 鈴木一孝, 西川直弘, 林知延: Ca/Si比の異なるC-S-Hの炭酸化, セメント・コンクリート論文集, No.43, pp.18-23, 1989