試験・研究



Relationship between moisture content and electrical resistance of hardened concrete specimens heated at high temperature.

木野瀬 透*1、吉田 夏樹*2、新 大軌*3、今本 啓一*4

1. はじめに

火害を受けたコンクリート構造物の調査診断において、 熱の影響程度を判断することが重要である。著者らは、 火害による熱の影響深さを判断する手法として、水を含 まないフェノールフタレイン溶液(以下、無水PP溶液) の呈色反応を利用する手法を検討してきた^{1)~5)}。

セメントペースト硬化体が高温加熱を受けると、内部 には極端な温度勾配が生じ、約400℃以上の熱を受けた 領域では、Ca(OH)2の熱分解により、CaOが生成する。 岸谷らは、火害を受けたコンクリートのはつり面に対し、 無水 PP 溶液を噴霧し、呈色状態を観察することで、 CaOが生成した領域を判別できると推察している⁶⁾。一 方で、著者らの実験において、無水 PP 溶液の呈色状態 とCaOの生成の有無に関係は認められなかった³⁾。端面 から温度勾配が生じるように加熱したセメントペースト 硬化体の含水率分布を測定すると、約150℃以上の熱を 受けた領域はほぼ絶乾状態になっており、当該領域にお いて呈色が薄くなることが明らかとなった³⁾。このように、 無水PP溶液を噴霧することで、火害により約150℃以 上の熱を受け、ほぼ絶乾状態になった部分を簡便に把握 できる可能性を報告した。また、コンクリート試験体に おいても同様の結果が得られることを報告した⁵⁾。

これまでの検討結果を火害調査に応用することで、広 範囲で火災が生じた際に熱の影響を受けた範囲および深 さを簡便に判断できる可能性がある一方で、無水PP溶 液の呈色状態の判別は定性的であり、測定者による差が 生じることが懸念される。そこで本研究では、熱の影響 により変化する「含水状態」を定量的に評価する手法を 検討した。コンクリートの含水状態を測定する手法とし て、電気抵抗および静電容量を用いる電気的手法⁷¹や、 変色紙および発色紙を用いる手法^{8),9)}等が提案されてい る。火害後に任意の位置で深さ方向に含水状態を測定す る場合、コンクリートの表面から平行に2つの小孔を削 孔したのち、孔内に棒状の電極を挿入し、電極間の電気 抵抗を測定する手法が有用と考えられる。

本研究では、コンクリートの含水状態と関係の深い 「電気抵抗」を用いた定量的な調査手法を検討すること を目的とし、高温加熱した試験体を対象とした実験を 行った。

なお、本報告は、過去の本誌^{10),11)}で報告した内容に 新たな実験結果を追加したものであり、次章において既 報の概要を説明する。

^{*1} KINOSE Toru :(一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 建材部 材料試験室

^{*2} YOSHIDA Natsuki : (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター 建材部 材料試験室 室長 博士 (工学)

^{*3} ATARASHI Daiki :島根大学 学術研究院 環境システム科学系 准教授 博士 (工学)

^{*4} IMAMOTO Kei-ichi:東京理科大学 工学研究科 建築学専攻 教授 博士(工学)

火害によるセメントペースト硬化体の含水 状態および化学的な変化がPP溶液の呈色状 態に及ぼす影響(既報の概要)

2.1 実験概要

火害を受けたコンクリートにおけるPP溶液の利用方 法について、岸谷ら⁶⁾は、無水PP溶液の呈色状態を観 察することでCaOが生成した領域を判断できると推察し ている。一方で、日本建築学会の指針¹²⁾において、火害 調査で使用するPP溶液は、JISA1152(コンクリート の中性化深さの測定方法)に記載されている約10%の水 を含むPP溶液(以下、有水PP溶液)を用いることが記 載されている。そこで、水の有無による2種類のPP溶 液の呈色状態を比較することを目的とし、火災を模擬し て加熱したセメントペースト硬化体を用いて実験を行った。

実験には、水セメント比70%のセメントペースト硬化 体 (φ100×200mm) を用いた。試験体は成型後、24時 間経過したのちに脱型し、実験に供するまで20℃の水中 で養生した。養生後の試験体の片端面(型枠に接してい た底面)から反対の端面(非加熱面)に向かって温度勾配 が生じるように著者らが提案する方法²⁾により加熱した (図-1)。加熱条件は、電気炉内の温度を室温から4時間 で900℃まで上昇させ、同温度で5時間保持したのち、 室温になるまで放冷した。放冷後の試験体を軸方向に割 裂し、一方に無水PP溶液を、他方に有水PP溶液を噴霧 し、呈色状態を確認した。また、同条件で加熱した試験 体を用いて、加熱面からの深さ方向に粉末X線回折(以 下、XRD)による成分分析および相対含水率の測定を行っ た。また、加熱面から0、25、50、100および150mm の位置にKシース熱電対を埋設した試験体を同条件で加 熱し、試験体内部の受熱温度を測定した。

2.2 実験結果の概要

2.2.1 水和物の化学的変化と無水PP溶液の呈色状態 加熱後の試験体の割裂面に対し、2種類のPP溶液を 噴霧した直後の呈色状態を図-2に示す。無水PP溶液を 噴霧した試験体では呈色状態に明瞭な濃淡が認められた。

対して、有水PP溶液を噴霧したものでは、無水PP溶液と概ね同じ深さ位置でわずかに濃淡が認められたものの、加熱面側は無水PP溶液と比較して濃く呈色した。

次に、XRDによる成分分析結果を無水PP溶液の呈色 状態に重ねて図-3に示す。加熱面から10mm毎に切断 した試験片の成分を分析すると、加熱面から30mmまで の範囲でCa(OH)2の熱分解によりCaOが生成していた。 このようなセメント水和物の化学的変化に対し、無水PP 溶液の呈色状態の濃淡が明瞭に変化するのは加熱面から





20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 加熱面からの距離(mm) (a) 無水PP溶液の呈色状態



0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 加熱面からの距離 (mm) (b) 有水PP溶液の呈色状態

図-2 PP溶液噴霧直後の呈色状態

Ca0 が生成した範囲 Ca0 が生成していない範囲

 0
 20
 40
 60
 80
 100
 120
 140
 160
 180
 200

 加熱面からの距離 (mm)
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100
 100

図-3 成分分析結果と呈色状態



約100mmの位置であり、岸谷らの報告⁶⁾に反して CaOの生成域を判断できないことが分かった。

2.2.2 高温加熱後の含水状態と無水PP溶液の呈色状態

加熱面から20mm毎に相対含水率を測定した結果、 受熱温度を測定した結果を、無水PP溶液の呈色状態に 重ねて図-4に示す。CaOが生成した加熱面から約 30mmまでの範囲は、約400℃以上の熱を受けた領域 であるのに対し、薄く呈色した部分は約150℃以上の熱 を受けた領域であった。この領域は、ほぼ絶乾状態に なった領域と概ね一致する。これより、無水PP溶液で はCaOが生成した領域ではなく、約150℃以上に熱を 受け、ほぼ絶乾状態になった領域を判断していることが 分かった。

この結果をコンクリート構造物の火害診断へ応用する ことで、火災により約150℃以上の熱を受け、ほぼ絶乾 状態になった領域を簡便に判断できる可能性がある。簡 便に約150℃以上の熱を受けた部分を把握できれば、圧 縮強度試験や受熱温度推定試験^{12)~14)}等の詳細な調査を 行う範囲を限定し、効率的に火害診断を進められる可能 性がある。

しかしながら、無水 PP 溶液による呈色状態の濃淡を 観察する方法は、測定者によるばらつきが生じる恐れの ある定性的な方法である。本稿においては、電気抵抗を 用いた定量的な方法について検討した結果を報告する。

3. 実験概要

3.1 実験1:電気抵抗の測定方法に関する検討 3.1.1 試験体の製作

本研究では、表-1に示す配(調)合で練り混ぜたコン クリートを使用し、直径100mm、高さ200mmの型枠 に打ち込んだ。試験体は24時間後に脱型し、実験に供 するまで91日以上水中(20℃)で養生した。

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)					
(%)	(%)	С	W	S1	S2	G	CA
50	46.5	340	170	586	252	970	2.35

C:普通ポルトランドセメント(トクヤマ社製、密度 3.16g/cm³)
W:回収水(スラッジ水)・地下水
S1:砕砂(京都府亀岡市産、表乾密度 2.65g/cm³)
S2:石灰砕砂(大分県津久見市産、表乾密度 2.68g/cm³)
G:砕石 2005(京都府亀岡市産、表乾密度 2.68g/cm³)

CA:高性能 AE 減水剤 標準形(I 種)(ポリカルボン酸系)

3.1.2 含水状態の調整方法

水中養生後の試験体を高さ方向の中央部で切断し、直 径100mm、高さ約95mmの試験体を15体作製した。 切断した試験体の切断面を開放面とし、打設面または型 枠底面と側面をアルミ箔粘着テープでシールしたのち、 105 ± 5 Cの乾燥機内に静置した。乾燥時間は、12、 24、48、72 および96時間とし、時間経過毎に3体の 試験体を乾燥機から取り出し、シリカゲルを入れたデシ ケータ内で室温 (20C)まで放冷した。

3.1.3 測定項目

(1) 電気抵抗

図-5に電気抵抗の測定方法の概要を示す。

室温 (20℃) まで放冷した試験体の開放面を速硬型の エポキシ樹脂系接着剤により補強し、側面を布粘着テー プで補強したのち、開放面側から振動ドリルを用いて、 平行に2つの小孔を削孔した。なお、骨材径を考慮して 小孔間距離を40mm、削孔深さを90mmとし、刃径 9.5mmのドリルビットを用いて削孔した。削孔した2つ の小孔内に測定部および接続部以外に絶縁被覆を施した 自作のブラシ型電極(材質:SUS304、電極径:10mm、 電極長:10mm、軸径:5mm、軸長:110mm)を挿入 した。挿入した電極とインピーダンス測定器 (LCRメー タ)をワニロクリップで接続し、電極間の電気抵抗を開 放面から90mmの位置まで10mm間隔で測定した。な お、測定する周波数により、周囲の電気機器等の影響を 受け、電気抵抗の値が不安定になることがある⁹⁾ことから、 印加電圧は1V、周波数は100Hzと1kHzの2条件とし た。また、測定は温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿 室で行った。



図-5 電気抵抗の測定方法

(2) 相対含水率

電気抵抗の測定後の試験体を約20mm毎に乾式で切断 し、得られた試料片について、切断後の質量、絶乾質量 および表乾質量を測定し、式(1)により、相対含水率(%) を求めた。なお、表乾質量は水中浸せきにより質量が恒量 となるまで吸水させて測定した。また、加熱面からの距離 を独立変数、相対含水率を従属変数とした直線近似によ り電気抵抗の測定位置における相対含水率を求めた。

3.2 実験2:高温加熱した試験体の電気抵抗

3.2.1 試験体の製作

試験体は、実験1と同一の配(調)合で製作したコンク リート試験体(直径:100mm、長さ200mm)とし、91 日以上水中で養生したのち、次項の加熱実験に供した。

3.2.2 加熱方法

養生後の試験体を片端面(型枠に接していた底面)か ら反対の端面(非加熱面)に向かって温度勾配が生じる よう、著者らが提案する方法²⁾により加熱した。電気炉 内の設定温度を2時間で室温(約20℃)から最高設定温 度(加熱温度)まで上昇させ、1時間保持したのち、そ のままの状態で室温まで放冷した。なお、試験体の加熱 温度は300、500、700および900℃とし、各加熱温度 で2体加熱した。

3.2.3 測定項目

(1) 電気抵抗

電気炉から取り出した試験体について、実験1と同様 に削孔したのち、電気抵抗を測定した。なお、電気抵抗 は各加熱温度で1体の試験体を対象とし、加熱面から 100mmまで10mm間隔で測定した。

(2) 相対含水率

電気抵抗を測定した後の試験体を約20mm毎に切断 し、実験1と同様に、式(1)により相対含水率(%)を求 めたのち、直線近似により加熱面から10mm毎の相対 含水率を求めた。なお、900℃で加熱した試験体では、 40mmまでのスライス片は切断時に細かく崩れ、表乾 質量の測定が出来なかった。測定可能であった「切断後 の質量」と「絶乾質量」が等しかった(水分を全く含んで いなかった)ため、相対含水率を0%とした。

4. 実験結果および考察

4.1 実験1:電気抵抗の測定方法に関する検討

105℃乾燥により含水状態を調整した試験体の電気抵抗と相対含水率の関係を図-6および図-7に示す。

本実験で含水状態を調整した試験体の相対含水率は約 2%から約70%までの範囲であった。この範囲では、 周波数に関わらず、相対含水率が大きくなるに伴い、電 気抵抗は小さくなった。両周波数において、電気抵抗と 相対含水率は全体的によく対応し、今回の電気抵抗の測 定方法により、コンクリート中の含水状態を評価できる ものと考えられる。

本研究では、火害により乾燥した領域を判断する目的 で使用するため、相対含水率が低い領域で電気抵抗の大 小を感度良く評価できた周波数100Hzでの測定が比較 的有用と考えられる。実験2において、高温加熱した試 験体の両周波数での測定結果を比較した。

4.2 実験2:高温加熱した試験体の電気抵抗 4.2.1 電気抵抗の測定結果

両周波数で測定した各加熱温度における電気抵抗と加 熱面からの距離の関係を図-8および図-9に示す。なお、 900℃で加熱した試験体の周波数100Hzでの測定にお いて、加熱面から40mmの位置までの電気抵抗が今回 使用したLCRメータの測定上限(200MΩ)を超えたた め、参考として200MΩとしてプロットすることとし た(図中では塗りつぶしなしの赤○で示す)。

測定する周波数によらず、加熱温度が高くなるに伴い、 同じ加熱面からの距離における電気抵抗は大きくなった。 また、加熱温度が高いほど、電気抵抗が大きくなる傾向 にあったが、周波数1kHzで測定した加熱温度300℃の 50 mm および加熱温度900℃の0~40 mmの位置で多 少の変動が認められた。この要因として、電極間に存在 するモルタルや粗骨材の量の差が電気抵抗の測定に影響 したものと考えられる。





4.2.2 電気抵抗と相対含水率の関係

両周波数で測定した各加熱温度における電気抵抗と相 対含水率の関係を図-10および図-11に示す。

加熱温度500℃から900℃では、電気抵抗と相対含水 率の関係は概ね同様であり、高温加熱した試験体におい ても、電気抵抗により含水状態を評価できている。また、 いずれの条件においても、電気抵抗が約20kΩ以上の 部分は、相対含水率が約20%以下であり、約150℃以 上の熱を受けた部分と考えられる。 なお、両周波数において、加熱温度300℃を除き、 105℃乾燥により得られた近似線と比較すると、電気抵 抗に対する相対含水率が低くなる傾向が認められた。こ の要因として、高温加熱した試験体では、105℃乾燥の 試験体と異なり、全面を開放した状態で加熱したことで、 全面から乾燥し、中心部と外周部で含水状態に差が生じ ている可能性がある。つまり、図-12に示すように、電 気抵抗は試験体の中心部で測定したのに対し、相対含水 率は全断面で測定したことが影響したと考えられる。



図-11 電気抵抗と相対含水率の関係 (周波数:1kHz)



図-12 電気抵抗および相対含水率の測定位置と 高温加熱による水分の乾燥方向のイメージ

4.2.3 電気抵抗と無水PP溶液による手法の比較

各温度で加熱した試験体の電気抵抗および相対含水率 と加熱面からの距離の関係について、無水PP溶液を噴 霧した直後の写真を重ねて図-13~図-16に示す。なお、 周波数100Hzの測定において、加熱温度900℃で測定 不可の点があったため、1kHzの測定結果を用いて考察 することとした。

300℃で加熱した試験体の無水PP溶液の呈色状態を 観察すると、全体的に濃い呈色を示したが、加熱面から 約8mmまでの位置では薄く呈色する程度であった。電 気抵抗は100kΩ程度であり、150℃以上の熱を受けた ものと考えられる。この領域は、加熱面から約10mm までの相対含水率が約20%以下(ほぼ絶乾状態)になっ た領域と一致する。

500℃および700℃で加熱した試験体の無水PP溶液 の呈色状態を観察すると、いずれの加熱温度においても、 相対含水率が約20%以下となるほぼ絶乾状態の領域で 呈色が薄くなっていた。無水PP溶液の呈色の濃淡が変 化する位置とほぼ同位置において、電気抵抗が約10k Ωから急勾配に大きくなる傾向が認められた。したがっ て、電気抵抗の測定により高温加熱により生じたコンク リート内部の含水状態の急激な変化を把握できると考え られる。

900℃で加熱した試験体の呈色状態を観察すると、加 熱面から約100mmまでの相対含水率が約20%以下の 領域では、呈色が認められなかった。この領域では、電 気抵抗が100kΩを上回り、150℃以上の熱を受け、ほ ぼ絶乾状態になっていることを評価できたと考えられる。

以上より、コンクリート構造物において火災が発生し た際、火害を受けた表面から深さ方向に電気抵抗を測定 することで、これまでの無水PP溶液による方法と同様 に高温によって乾燥が進行した領域を定量的に調査でき る可能性がある。しかしながら、今回の検討において、 実構造物の供用中における経年による乾燥、中性化の影 響やセメント水和物等の化学的変化を考慮できていない。 今後、電気抵抗と無水PP溶液による両手法について、 実際の火害調査に応用できるように様々な条件でデータ を蓄積し、使用方法を提案したいと考えている。また、 小型電気炉による高温加熱方法では、試験体断面の含水 勾配を、表面から深さ方向へ均一にすることは難しい。 今後、水平炉を用いた大型試験体の加熱実験を行い、本 研究で得られた結果と比較する予定である。



冊 1.E+03

0 20

5. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の火害を想定し、内 部に温度勾配が生じるように高温で加熱した試験体を用 いて、含水状態と関係の深い「電気抵抗」について検討 した結果、以下の結論を得た。

- (1) 105℃乾燥した試験体を用いて、今回の実験における電気抵抗の測定方法は、コンクリートの含水状態を端面から深さ方向に評価できることを確認した。
- (2)電気抵抗を測定する周波数を100Hzと1kHzで検討した結果、100Hzの方が含水状態の変化を感度良く評価できた。一方で、今回使用した測定器では、高温加熱により絶乾状態になると電気抵抗が測定上限を超えたため、測定できないことがあった。
- (3)高温加熱した試験体は、電気抵抗から想定される含水状態より乾燥していた。この要因として、電気炉で加熱した試験体では加熱面以外から乾燥した可能性がある。
- (4)高温加熱した試験体において、加熱面から深さ方向 に電気抵抗を測定することで、高温の影響によりほ ぼ絶乾状態となった領域を定量的に判断できた。

【参考文献】

0

40 60 80 100 120 140 160 180 200

加熱面からの距離(mm)

図-16 電気抵抗と相対含水率の測定結果

(加熱温度:900℃)

- 吉田夏樹,新大軌,木野瀬透,俵あかり:火災の影響を受けたコンクリートの化学的変化に関する一検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.39, No.1, pp.643-648, 2017
- 2)吉田夏樹,奥村勇馬,木野瀬透,新大軌:高温下における 二酸化炭素の作用がセメントペースト硬化体の表面から深 さ方向への化学的変化に及ぼす影響,コンクリート工学年 次論文集, Vol.42, No.1, pp.461-466, 2020
- 3)木野瀬透,吉田夏樹,奥村勇馬,新大軌:高温加熱を受けたセメントペーストの含水率および構成化合物とフェノールフタレイン溶液による呈色状態の関係,コンクリート工学年次論文集,Vol.42,No.1,pp.1576-1581,2020
- 4)木野瀬透,吉田夏樹,奥村勇馬,新大軌:高温加熱したセメントペーストの水分浸透に関する基礎的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.43, No.1, pp.1187-1192,2021
- 5) 木野瀬透,吉田夏樹,新大軌,今本啓一:高温加熱したコ ンクリートの含水状態と電気抵抗に関する検討,コンク リート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1282-1287, 2022
- 6) 岸谷孝一,森実:火害を受けたコンクリート建物の受熱温度 推定,セメント・コンクリート, No.302, pp.13-22, 1972
- 7)日本コンクリート工学会:物理化学的解釈に基づく電気化 学的計測手法に関する研究委員会報告書・シンポジウム論 文集,2015.9
- 8) 平賀友晃,三浦勇雄,坂牧政義:発色紙によるコンクリートの湿度および含水測定方法に関する研究,セメント技術 年報, Vol.38, pp.198-201, 1984.12

- 9) 笠井芳夫,松井勇,逸見義男,湯浅昇:乾燥度試験紙を用 いた構造体コンクリートの水分蒸発速度測定方法の提案(そ の1,その2),日本建築学会大会学術講演梗概集A, pp.1291-1294,1994
- 10) 木野瀬透,吉田夏樹,奥村勇馬,新大軌:フェノールフタレイン溶液を利用したコンクリートの火害調査手法の検討,GBRC, Vol.46, No.1, pp.12-18, 2020.1
- 木野瀬透,吉田夏樹,奥村勇馬,新大軌:高温加熱後のセメントペースト硬化体の水分浸透に関する基礎的検討, GBRC, Vol.47, No.1, pp.26-32, 2021.1
- 12)日本建築学会:建物の火害診断および補修・補強方法指 針・同解説,2015
- 13) 奥村勇馬,吉田夏樹,新大軌:火害を受けたコンクリートの受熱温度推定手法の改良,GBRC, Vol.44, No.4, pp.34-39, 2019.10
- 14) 吉田夏樹,奥村勇馬,新大軌:化学混和剤濃度に着目した コンクリートの受熱温度推定手法の改良,コンクリート工 学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.551-556, 2019

【執筆者】



*1 木野瀬 透 (KINOSE Toru)



*2 吉田 夏樹 (YOSHIDA Natsuki)



*3 新 大軌 (ATARASHI Daiki)



*4 今本 啓一 (IMAMOTO Kei-ichi)