

論文 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

木野瀬 透*1・吉田 夏樹*2・奥村 勇馬*3・新 大軌*4

要旨: コンクリートが火災を受けると、含水状態が変化する。著者らのこれまでの研究により、受熱温度勾配が生じた試験体に対し、水を含まないフェノールフタレイン (PP) 溶液を噴霧すると、約 150 °C以上の熱を受け、乾燥した領域を簡便に調査できることが分かった。本研究では、高温加熱後に吸水したセメントペースト試験体を用い、火災後の消火活動等による吸水が無水の PP 溶液を用いた調査手法に及ぼす影響および受熱温度と水分浸透の関係について検討した。高温加熱後に吸水した場合においても、無水の PP 溶液を用いた調査手法が適用できた。また、500 °C以上の熱を受けると、水分の浸透速度が大きくなることがわかった。

キーワード: セメントペースト, 高温加熱, 含水率, 水分移動, 水分浸透深さ, フェノールフタレイン

1. はじめに

火害を受けたコンクリート構造物において、火害の影響深さを判断する手法の一つとして、フェノールフタレイン (以下、PP) 溶液の呈色反応を利用する方法が提案されている¹⁾。

火害を受けたコンクリートにおける PP 溶液の呈色反応に関する知見として、岸谷ら²⁾は、高温により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が分解されて CaO が主体となった領域は、「水を含まない」PP 溶液を噴霧することで、定性的に判断できると述べている (CaO の生成領域は、水を含まない PP 溶液で呈色しないものと推察されている)。

著者らは、火害を受けたセメント硬化体の PP 溶液の呈色反応について、含水状態および化学的な変化の観点から基礎的なデータを蓄積してきた^{3),4),5)}。

セメン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 150 °C以上の熱を受けた部分では極度な乾燥状態となり、400 °C以上の熱を受けた部分では、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の熱分解により、 CaO が生成する³⁾。このような硬化体に対し、水を含まない PP 溶液を噴霧すると、受熱約 150 °C以上を境に呈色状態に変化が見られた。約 150°C以上の熱を受け、極度に乾燥した部分ではほとんど呈色せず、水分を含んだ部分で濃く呈色した⁵⁾。

このように、水を含まない PP 溶液を噴霧することで、既往の報告²⁾に反して CaO が主体となった領域を判断することはできないことが明らかになった一方で、火害により約 150 °C以上の熱を受け、極度に乾燥した領域を簡便に判断できる可能性を報告した。ただし、この検討は、火災による乾燥のみを考慮した検討であり、火災時の消火活動等による表面からの吸水の影響については不明な点が残された。

また、高温加熱を受けたコンクリートは、セメントの化学的変化等の影響により圧縮強度は低下するが、その後の吸水により一定程度の強度が回復するとされる⁶⁾。このことから、火害を受けたコンクリート構造物の今後の品質を評価するうえで、高温加熱を受けたコンクリートの水分浸透性状を知ることは重要である。これまで、著者らは、試験体の内部に温度勾配が生じるように加熱した試験体を用いて検討してきたが、吸水の影響を検討する場合、試験体の受熱温度に応じて水分の浸透性状が変化することが考えられる。

そこで本研究では、高温加熱後に吸水した場合における無水 PP 溶液を用いた簡易調査手法の適用性および受熱温度と水分浸透の関係の 2 つの課題について検討することを目的とし、温度勾配が生じるように高温加熱した試験体および全体に均一な温度履歴を受けた試験体を対象とした吸水試験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験 1: 高温加熱後の吸水が無水 PP 溶液の呈色状態に及ぼす影響

2.1.1 試験体の製作

実験には、骨材の影響がなく、PP 溶液の呈色状態を容易に判断できるセメントペーストを用いることとした。試験体の配合条件は、研究用ポルトランドセメント (セメント協会) を用い、水セメント比 70 %で練り上げた。約 1 時間毎に練り返し、ブリーディングが見られなくなったのちに $\phi 100 \times 200$ mm の型枠に打ち込んだ。なお、試験体は 24 時間後に脱型し、実験に供するまで水中で養生した。

*1 (一財) 日本建築総合試験所 材料部材料試験室 (正会員)

*2 (一財) 日本建築総合試験所 材料部材料試験室 室長 博士 (工学) (正会員)

*3 (一財) 日本建築総合試験所 材料部材料試験室

*4 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) (正会員)

2.1.2 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、筆者らが提案する方法⁴⁾により加熱した。炉内の温度を約 3.75 °C/分で室温から設定温度まで上昇させ、5 時間保持したのち、そのままの状態ですべて室温まで放冷した。なお、炉内には N₂ ガスを流入させ、電気炉の設定温度は 500、700 および 900 °C とした。また、加熱面から 0、25、50、100 および 150 mm の位置に K シース熱電対を埋設した試験体を 3 体製作し、各温度における試験体内部の受熱温度を測定した。受熱温度の測定結果を図-1 に示す。

2.1.3 吸水試験

電気炉から取り出した試験体について、図-2 に示すように試験体側面を防水アルミテープでコーティングしたのち、容器（幅 190 mm×奥行 240 mm×高さ 35 mm）に試験体の加熱面を下にして設置した。次に、試験体の加熱面から高さ 20 mm 位置まで上水道水を注ぎ、試験体を部分的に浸せきさせた。水は毛管上昇により試験体に浸透する。なお、浸せき時間は、0（吸水なし）、30、60 および 180 分とした。

2.1.4 試験項目

(1) PP 溶液の呈色状態の観察

加熱後の試験体を軸方向に割裂したのち、一方の割裂面に対して、無水 PP 溶液を噴霧し、呈色状態を観察した。無水 PP 溶液は、高温加熱を受けたセメント硬化体に噴霧することで、約 150 °C 以上の熱を受け、極端に乾燥した領域を判断することが出来る⁵⁾。なお、観察は、相対湿度約 20 % の室内で、無水 PP 溶液を噴霧した直後に行った。

(2) 試験体の相対含水率の測定

割裂した試験体の残りの一方を約 20 mm ごとに切断し、得られたスライス片について、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 (%) を測定した。なお、表乾質量は水中浸漬により一定質量となるまで吸水させた値とした。

$$\text{相対含水率} = \frac{\text{切断後の質量} - \text{絶乾質量}}{\text{表乾質量} - \text{絶乾質量}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

(3) 水分浸透速度係数の算出

無水 PP 溶液を噴霧した試験体を用い、水の浸透深さを測定した。無水 PP 溶液の特性上、吸水した領域では濃く呈色することが想定される。加熱面から濃い赤紫色に呈した部分を吸水による水分浸透深さとし、金属製直尺を用いて 1 mm 単位で測定した。また、JSCE-G 582-2018⁷⁾により、水分浸透速度係数 (A) および定数 (B)

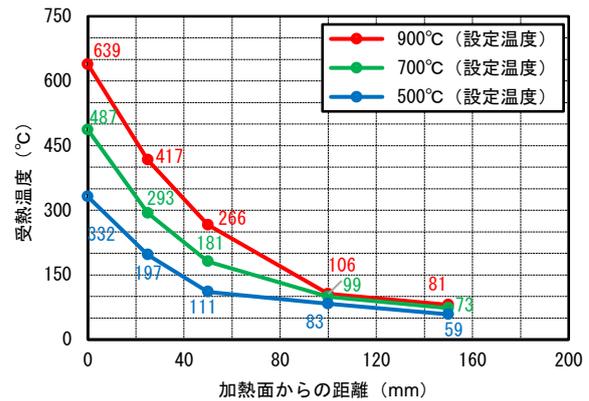


図-1 受熱温度の測定結果

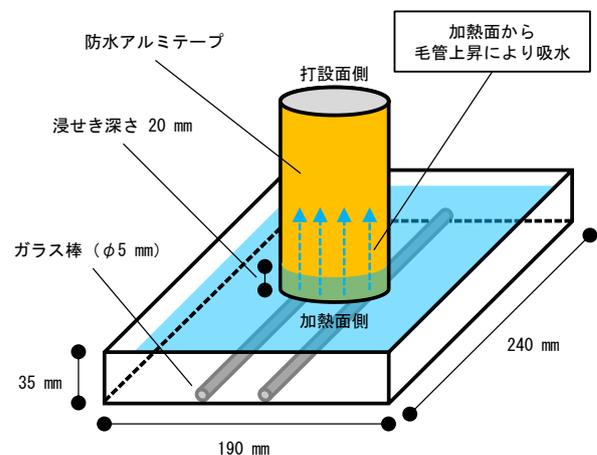


図-2 吸水方法

を算出した。なお、それぞれの値は、式(2)および式(3)により求めた。得られた値から式(4)により、浸せき時間 (t) と水分浸透深さ (L) の関係式を求めた。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}})^2} \quad \text{式(2)}$$

$$B = \bar{L} - A \cdot \bar{\sqrt{t}} \quad \text{式(3)}$$

$$L = A \cdot \sqrt{t} + B \quad \text{式(4)}$$

A : 水分浸透速度係数 (mm/√min)

n : データ数

√t_i : i 番目のデータの浸せき時間の平方根 (√min)

√t̄ : 浸せき時間の平方根の平均値 (√min)

L_i : i 番目のデータの水分浸透深さ (mm)

L̄ : 水分浸透深さの平均値 (mm)

B : 定数

2.2 実験2：受熱温度がセメントペーストの吸水性状に及ぼす影響

2.2.1 試験体の製作

試験体は、実験1と同様にセメントペーストとし、全体を均一に加熱する目的で比較的小さいφ5×10 cmの試験体を作製した。試験体の配合条件は、水セメント比40、55および70%とした。試験体は打込みから24時間後に脱型し、材齢28日以上水中で養生したのち、40℃で7日間以上、105℃で7日間以上の乾燥を行い、加熱に供するまでの間、40℃の乾燥機で保管した。

2.2.2 加熱方法

乾燥機から取り出した1体の試験体を約20℃のデシケータ内で2時間以上静置したのち、電気炉内に打設面を上向きに設置し、加熱した。加熱温度（電気炉の設定温度）は300、500および700℃とし、各加熱温度で3体の試験体を加熱した。加熱方法は、室温（約20℃）から毎分5℃の速度で設定温度を上昇させ、各加熱温度に到達後、3時間保持したのち、炉内を放冷した。

2.2.3 吸水試験

電気炉から取り出した試験体について、実験1と同様の吸水試験を行った。浸せき深さは、試験体の加熱面から高さ10 mmとし、浸せき時間は、5、30および60分とした。なお、100℃乾燥後に40℃乾燥機内で保管した試験体についても同様に試験した。

2.2.4 実験項目

(1) 試験体の質量含水率の測定

実験1と同様に、吸水後の試験体を軸方向に割裂し、割裂片の一方を用い、式(5)により質量含水率(%)を測定した。なお、水セメント比に応じて吸水量が変化することから、本来は相対含水率により比較することが望ましいと考えられる。しかし、今回の実験においては、吸水試験後に試験体内部にひび割れが生じ、表乾質量を測定できなかったため、質量含水率を用いて評価することとした。

$$\text{質量含水率} = \frac{\text{吸水後の質量} - \text{絶乾質量}}{\text{絶乾質量}} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

(2) 水分浸透速度係数の算出

割裂片の残りの一方の割裂面に対し、無水PP溶液を噴霧したのち、吸水面からの水分浸透深さを測定した。その後、実験1と同様に式(4)より、浸せき時間(t)と水分浸透深さ(L)の関係式を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 実験1：高温加熱後の吸水が無水PP溶液の呈色状態に及ぼす影響

3.1.1 加熱および吸水による含水率の変化

図-3に加熱面からの距離、相対含水率および受熱温

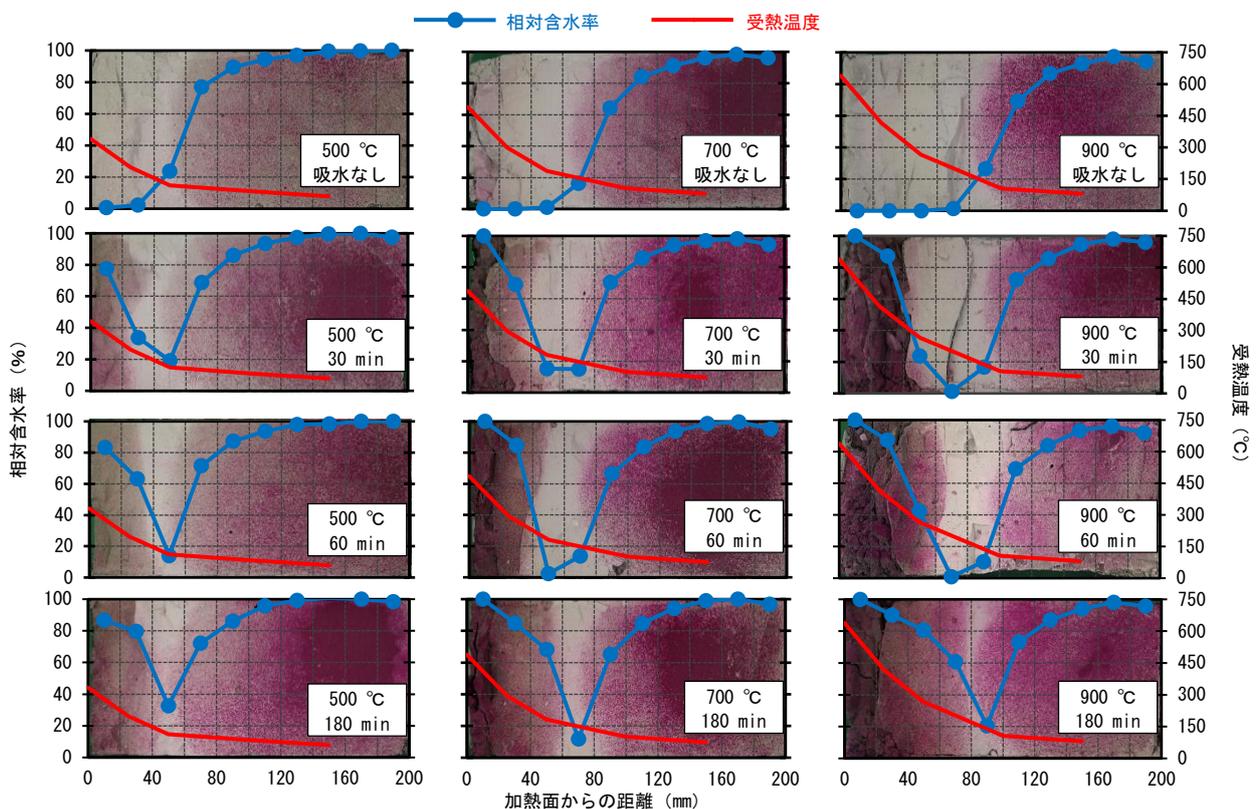


図-3 加熱面からの距離と相対含水率および受熱温度の関係

度の関係について、無水 PP 溶液を噴霧した直後の写真を重ねて示す。

各加熱温度の「吸水なし」を比較すると、受熱約 150 °C 以上の表層領域はほぼ絶乾状態となり、当該絶乾領域は加熱温度の上昇に伴い大きくなった。

次に、加熱温度ごとに「吸水」の影響を見ると、いずれも浸せき時間の経過に伴い、上記絶乾領域の含水率が加熱面から深さ方向へと徐々に高くなった。ただし、吸水 180 分においても試験体内部は飽水状態にならず、含水率分布の曲線は「V 字」を描く結果となった。

3.1.2 PP 溶液の呈色状態の観察

各加熱温度の「吸水なし」を観察すると、いずれも相対含水率が高い領域では濃い呈色を示す一方で、相対含水率が低い領域（約 20%以下）では呈色しないか薄く呈色する程度となり、既往の実験結果⁵⁾と整合した。

次に、「吸水」の影響を見ると、いずれも吸水により相対含水率が増加した領域では濃く呈色する結果となったが、含水率の低い V 字の「谷」の領域では、明瞭な呈色を示さなかった。つまり、吸水前と同様に、熱の影響領域を判別できている。

これより、消火活動による吸水を受けたコンクリートにおいても、無水 PP 溶液を噴霧して呈色状態を確認することで、約 150 °C 以上の熱を受けた深さを判断できる可能性があることが分かった。なお、今回の実験において、実際の消火活動における吸水条件、経年による乾燥や中性化の影響は考慮しておらず、今後の検討を要する。

3.1.3 吸水による水分浸透深さと浸透速度係数

吸水による水分浸透深さの測定結果を図-4 に示す。

相対含水率分布と同様に、加熱温度が高くなるほど、吸水時間の経過に伴い、水分浸透深さが大きくなった。

各加熱温度における水分浸透深さの実測値および式(4)により求めた浸せき時間と水分浸透深さの関係を図-5 に示す。加熱温度が高いほど、水分浸透速度係数が大きくなった。これは、加熱温度が高いほど、加熱面から離れた部分までひび割れやセメントの化学的変化が生じていることが要因と考えられる。実験 2 において、受熱温度と水分浸透深さの関係について詳細に検討した。

3.2 実験 2：受熱温度がセメントペーストの吸水性状に及ぼす影響

3.2.1 質量含水率の測定結果

各水セメント比における浸せき時間毎の質量含水率の測定結果を図-6 に示す。

いずれの水セメント比においても、加熱温度に関わらず、浸せき時間の経過とともに質量含水率が増加していた。また、加熱温度 100 °C と 300 °C の質量含水率は同程度であった。なお、加熱温度 500 °C 以上では、300 °C 以下と比較して質量含水率が大きくなり、浸せきによる吸

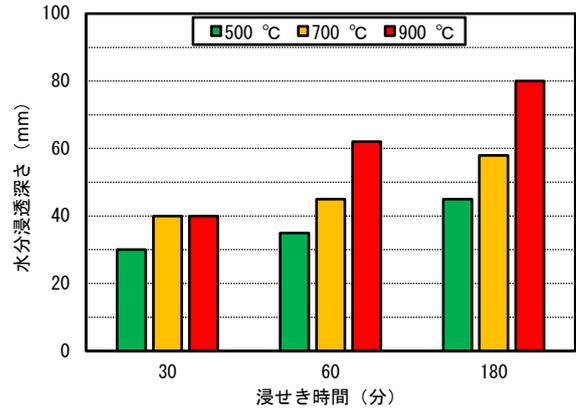


図-4 水分浸透深さの測定結果（実験 1）

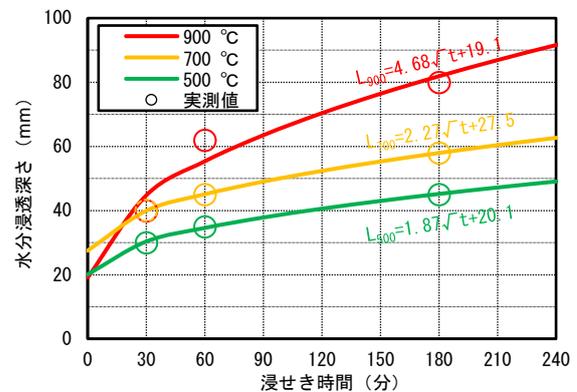


図-5 浸せき時間と水分浸透深さの関係（実験 1）

水量が大きいことが分かる。

また、水セメント比が大きいほど、質量含水率が大きくなる傾向が認められた。これは、水セメント比に比例して、セメントペースト中の空隙量が大きくなるためと考えられる。

3.2.2 吸水による水分浸透深さと浸透速度係数

各水セメント比における水分浸透深さの実測値および式(4)により求めた浸せき時間と水分浸透深さの関係を図-7 に示す。

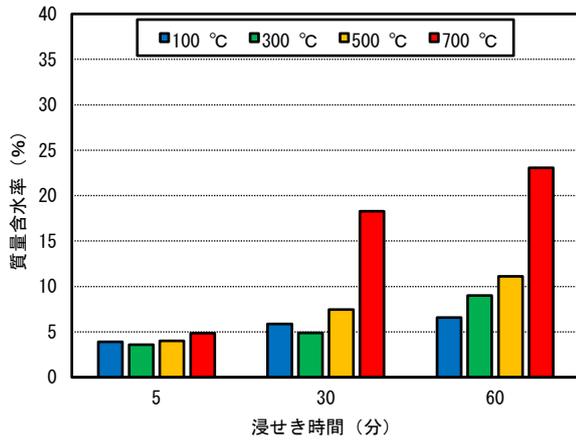
いずれの水セメント比においても、概ね加熱温度が高いほど、水分浸透速度係数が大きくなった。また、加熱温度 300 °C 以下と 500 °C 以上で水分浸透速度係数の傾向に変化が認められた。400 °C 付近からセメント組成中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が分解し始めるため³⁾、加熱温度 500 °C 以上では、熱分解により CaO が生成していると考えられる。

また、吸水時の環境温度が高くなると、水の粘性係数に反比例して、水分浸透速度係数が大きくなることが報告されており⁸⁾、加熱温度 500 °C 以上の試験体では、 CaO が再水和した際に生じた水和熱により、水分浸透速度係数が大きくなった可能性が考えられる。なお、吸水後に試験体に触れると、発熱していることが確認できた。したがって、高温加熱を受けたセメント硬化体の水分浸透

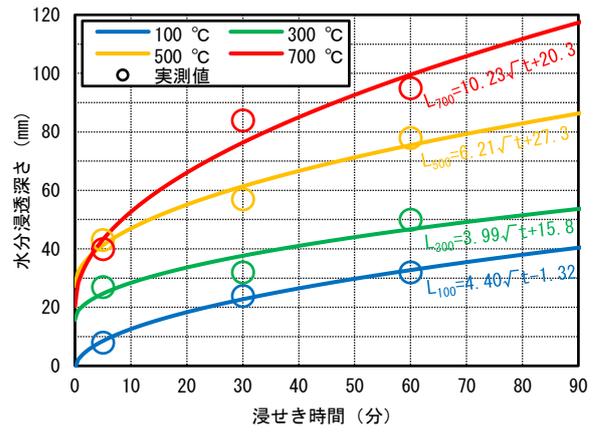
性状を評価する場合、セメント水和物の化学的変化および水和熱による水の粘性の変化を考慮する必要があると考えられる。

今回の実験において、水セメント比 40%の実測値と関係式の差が、水セメント比 55%および 70%と比較して大きくなった。この要因として、高温加熱前の乾燥処理により生じたひび割れが影響しているものと考えられる。

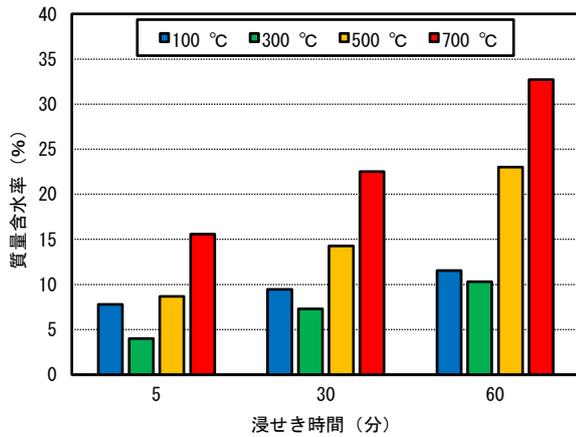
今後、高温加熱の前処理方法について、検討をする必要がある。また、今回の検討では、各パラメータにつき 1 体で実験したため、今後、繰り返し試験により再現性の確認を行うとともに、より火害時の環境を想定し、高温時における水分浸透速度係数のデータを取得したいと考えている。



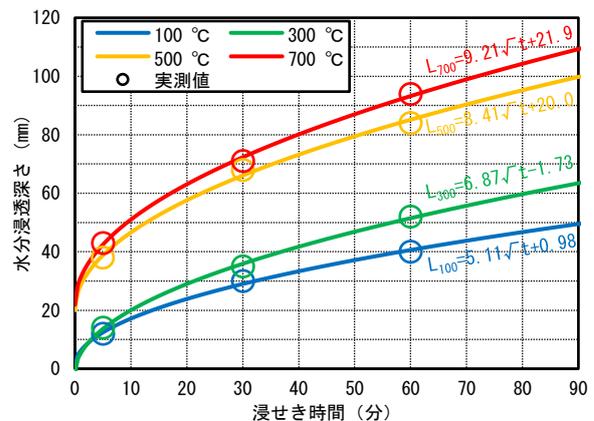
(a) 水セメント比 40 %



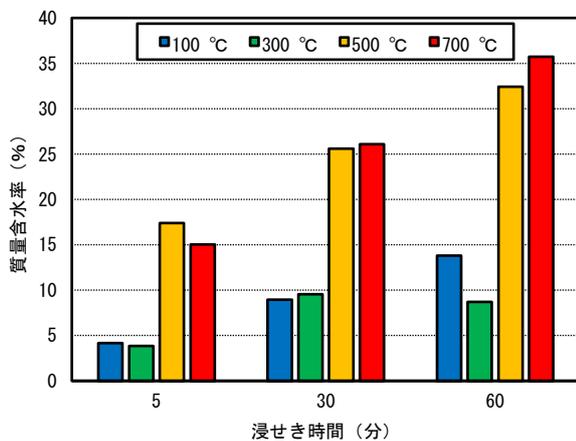
(a) 水セメント比 40 %



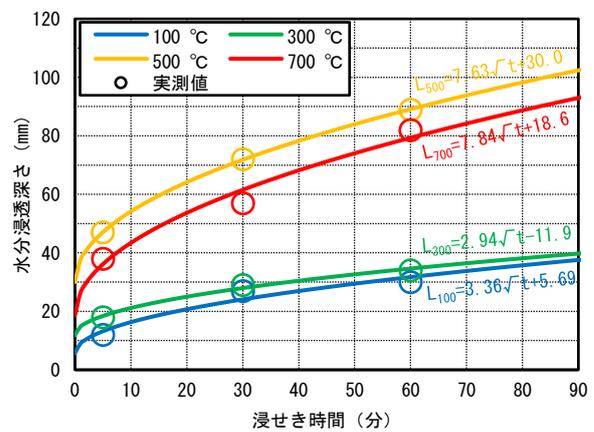
(b) 水セメント比 55 %



(b) 水セメント比 55 %



(c) 水セメント比 70 %



(c) 水セメント比 70 %

図一6 質量含水率の測定結果 (実験 2)

図一7 浸せき時間と水分浸透深さの関係 (実験 2)

4 まとめ

本研究では、内部に受熱温度勾配が生じた試験体および全体を均一に高温加熱した試験体を用いて、水分の浸透性状に関する検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 受熱温度勾配が生じた試験体において、水を含まない PP 溶液を噴霧すると、約 150 °C以上の熱を受け、乾燥が進んだ領域を境に呈色状態に変化が認められた。
- (2) 受熱温度勾配が生じた試験体の加熱面から吸水後に水を含まない PP 溶液を噴霧すると、吸水により水分が浸透した部分で濃い呈色が認められた。今回の実験条件では、すべての試験体で加熱面から吸水した領域、乾燥が進んだ領域および 150 °C以下の受熱領域を判断できた。
- (3) 火災後に消火活動等による吸水を受けたコンクリートにおいても、水を含まない PP 溶液による呈色状態を確認することで、約 150 °C以上の受熱深さを判断できる可能性がある。
- (4) 全体を均一に高温加熱した試験体において、浸せき時間の経過とともに、含水率が大きくなる傾向が認められた。
- (5) 全体を均一に高温加熱した試験体において、水セメント比によらず、浸せき時間の経過とともに、水分浸透深さが大きくなる傾向が認められた。この傾向は、300 °C以下と 500 °C以上の加熱温度を境に変化した。この要因として、高温加熱による Ca(OH)_2 の熱分解と吸水による CaO の再水和の際に生じた水和熱が影響したものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物の火害調査診断および補修・補強方法指針・同解説，2015
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 原田有：建築防火構法，工業調査会，1973
- 7) 土木学会：JSCE-G 582 短期の雨掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案），2018
- 8) 越川茂雄，萩原能男：コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究，土木学会論文集，Vol.42，pp.183-191，1991