

報告 表層透気試験および色彩測定による火害を受けたコンクリートの劣化評価手法に関する基礎的研究

春畑 仁一^{*1}・迫井 裕樹^{*2}・内田 慎哉^{*3}・池田 憲一^{*4}

要旨：本研究では、ガス加熱炉により人工的に火害の程度が異なる複数のコンクリート試験体を作製し、加熱面において表層透気試験および色彩測定に基づく方法のそれぞれを適用し、両手法の劣化評価方法としての適用可能性について検討した。その結果、表層透気試験により得られる KT は、加熱温度 300°C 程度で著しく大きくなり、さらに、 500°C 以上では、加熱面に生じたひび割れの影響によって測定が困難であった。色彩測定では、 L^* 、 a^* 、 b^* 値から求めた色差 (ΔE^*ab) により、コンクリート表面の加熱温度を把握できる可能性があることを示唆した。

キーワード：コンクリート、劣化、火害、非破壊試験、表層透気試験、表層透気係数、色彩測定、色差

1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに火災による劣化現象がある¹⁾。日本建築学会から、2015年、「建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説²⁾」が発行された。また、日本コンクリート工学会では、同年、「高温環境下におけるコンクリートの性能評価に関する研究委員会（委員長：兼松 学 東京理科大学 教授）」が発足され、コンクリートの火害に関する研究の機運が高まっている。

火害を受けたコンクリートの調査方法は、文献1や2に幾つか紹介されているものの、研究および調査事例の報告は少ないのが現状である。

そこで本研究では、研究事例の蓄積を目的として、ガス加熱炉により人工的に火害の程度が異なる複数のコンクリート試験体を作製し、加熱面において非破壊試験として表層透気試験および色彩測定をそれぞれ適用し、火害による劣化評価方法としての適用可能性について検討することを目的とした。

2. コンクリート試験体および加熱試験

2.1 試験体

試験体は、図-1に示すように、長さ900mm、幅900mm、厚さ300mmの直方体としたものを5体作製した。加熱後の試験体の移動を考慮して、加熱面からかぶり(厚さ)165mmの位置に用心鉄筋(異形棒鋼(呼び名:D13))を4本配置した(図-1参照)。コンクリートは、生コン工場で作成した呼び強度:24を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント:普通ポルトランドセメント(密度: $3.15\text{g}/\text{cm}^3$)、水:上水道水および上澄水、細骨材:佐賀県

小川島産海砂(表乾密度: $2.56\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率:2.80)および京都府亀岡市産砕砂(表乾密度: $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率:2.85)、粗骨材:京都府亀岡市産砕石(岩種:硬質砂岩、表乾密度: $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ 、実積率:58%)、混和剤:AE減水剤標準型I種である。コンクリートの配(調)合を表-1に示す。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランプ8.5cm、空気量3.6%である。打設後、強度試験用の円柱供試体は直ちに現場封緘養生を行い、材齢28日にJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験を実施した。その結果、圧縮強度は $31.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。一方、試験体は、室内気中養生し

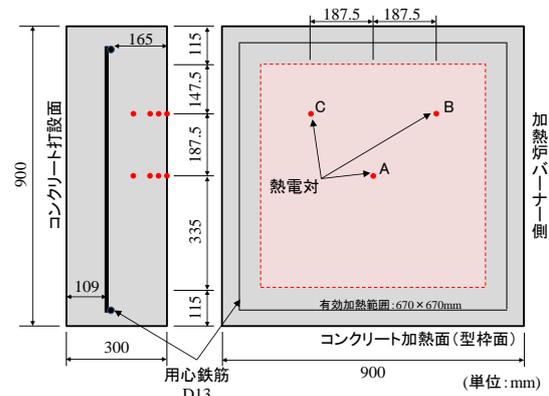


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
		W	C	SI	S2	G	A
57.0	44.7	168	295	560	240	1023	2.950

W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W: 水, C: セメント, SI および S2: 細骨材, G: 粗骨材, A: 混和剤

*1 (一財) 日本建築総合試験所 試験・研究センター (正会員)
 *2 八戸工業大学 工学部土木建築工学科准教授 博士(工学) (正会員)
 *3 立命館大学 理工学部環境システム工学科講師 博士(工学) (正会員)
 *4 東京理科大学 国際火災科学研究科教授 博士(工学) (正会員)

た後、材齢7日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内にて静置した。なお、試験体5体のうち加熱試験に供する4体については、図-1に示すA～Cの3箇所に、加熱するコンクリート表面から0、25、50、100mmの位置にK熱電対をそれぞれ設置した。

2.2 加熱試験

試験体の加熱は図-2に示すガス加熱炉を使用した。試験体は、天井スラブの加熱を想定し、試験体の長さ900mm、幅900mmの型枠面(有効加熱寸法:長さ670mm×幅670mm)が炉内に接するように設置した。

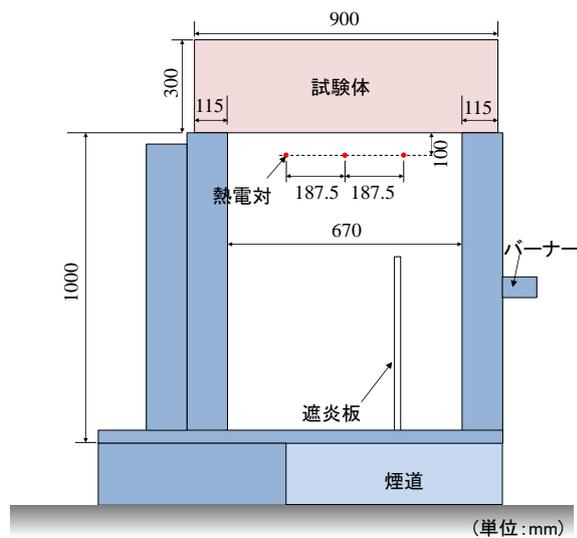


図-2 加熱試験の概要

加熱試験に供する試験体は計4体であり、火害による劣化程度にバリエーションを設けるため、試験体ごとに加熱温度をそれぞれ設定した。具体的には、都市ガス(46090kJ/m³)を熱源とし、ISO834に規定する標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、図-1に示すA～Cのコンクリート表面から0mmにある3本の熱電対でそれぞれ測定した温度の平均値が110、300、500、700℃となるまで各試験体を加熱した。これらの温度を本研究では加熱温度と呼ぶことにする。以上より、加熱温度のバリエーションとしては4水準となる。いずれの試験体においても加熱温度を60分間保持し、その後にガスバーナーによる加熱を終了した。加熱終了後、加熱炉側面の炉蓋を開放し、加熱面のコンクリート表面温度(加熱温度を計測した3本の熱電対での平均値)が50～80℃になるまで加熱炉上に静置した。なお、加熱時の試験体材齢は、表-2に示すとおりである。

2.3 加熱試験中の炉内およびコンクリートの温度履歴

加熱温度が700℃の場合の炉内温度およびコンクリートの温度履歴を図-3にそれぞれ示す。図中に示す0、25、50、100mmの温度は、図-1に示すA～Cに設置した同一深さ3本の熱電対でそれぞれ計測した温度の平均

値である。図より、60分間にわたって設定した加熱温度700℃にて加熱できていることがわかる。また、この期間における図に示すA～Cに設置した加熱面0mmでの温度差は、最大で47℃であった。したがって、試験体の有効加熱範囲全面にわたって、設定した加熱温度にて概ね加熱されていたと推測できる。なお、その他の試験体においても設定した加熱温度で加熱されており、温度差も25～83℃の範囲であった。

表-2 試験体の加熱時材齢とコア採取箇所・本数

加熱温度(℃)	加熱時の材齢(日)	コア採取箇所・本数		
		バーナー側付近	加熱中央	非バーナー側付近
未加熱	—	I・1本	1本	I・1本
110	344	II・1本	1本	I・1本
300	260	II・1本	1本	II・1本
500	218	I・1本	1本	II・1本
700	295	I・1本	1本	I・1本

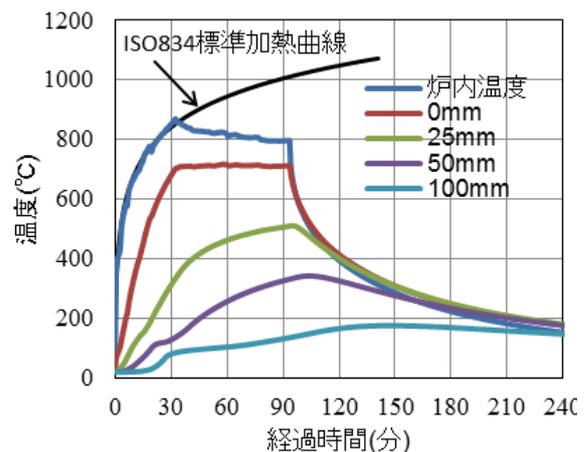


図-3 加熱温度700℃の試験体における温度履歴

3. 加熱後の試験体加熱面の外観およびコンクリートの圧縮強度・静弾性係数・中性化深さ

3.1 コンクリート表面の外観

写真-1に、加熱面中央部(100×100mm)のコンクリート表面の写真を示す。写真より、110℃加熱の試験体は、外観上変色やひび割れは確認できないが、アセトンを浸み込ませた布でコンクリート表面を拭くと微細ひび割れが生じていることを確認した。300℃加熱の試験体は、解像度が低く判断しにくいですが、加熱領域が僅かにピンク色に変色し、ひび割れが生じていた。500℃加熱の試験体では、加熱領域が全体的にピンク色を呈し、加熱部分と非加熱部分が明確に識別でき、加熱面全体にひび割れが生じていた。700℃加熱の試験体は、加熱領域が灰白色に変色し、加熱部分と非加熱部分を容易に識別可能であり、ひび割れが加熱面全面に生じていた。

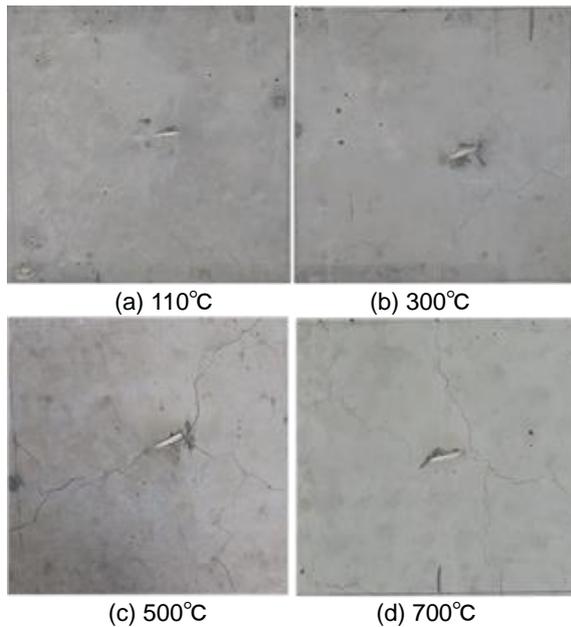


写真-1 加熱面中央部 100×100mm のコンクリート表面の写真（写真中央には熱電対）

3.2 コンクリートコアの採取

加熱後の各試験体からコア（直径 83mm）を採取した。採取した位置は、図-4 に示すとおり、バーナー側付近 2 箇所、加熱中央 1 箇所、バーナーから離れた箇所（非バーナー側）2 箇所とした。いずれの試験体においても、4 章で示す非破壊試験の測定が終わった後（加熱試験日の翌々日）に、加熱面側からコアを採取した。各試験体（加熱温度）からコアを採取した箇所とその本数との対応関係を表-2 に示す。なお、比較のため、加熱していない試験体からも材齢 310 日にコアを採取した。

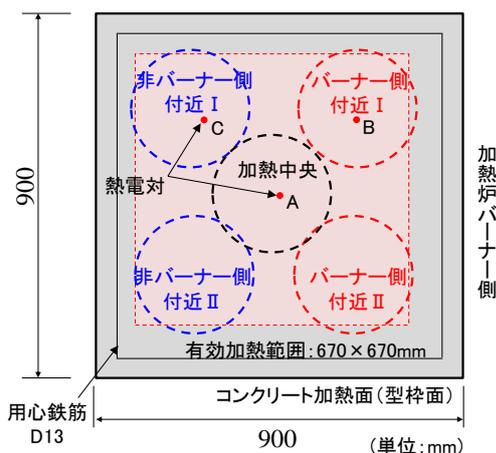


図-4 コンクリートコアの採取位置

3.3 採取したコアの圧縮強度・静弾性係数・中性化深さ

採取したコアはいずれも採取翌日に圧縮強度試験および静弾性係数の測定を、採取日の翌々日に中性化深さの測定を行った。圧縮強度試験は JIS A 1107「コンクリ

ートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に、静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に、中性化深さは JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」にそれぞれ基づき行った。得られた結果を表-3 にそれぞれ示す。表に示すとおり、加熱温度 500°C の中性化深さについては、加熱温度 700°C より大きい結果となった。既往の研究成果^{3),4)}から、加熱温度と中性化深さの関係については不明確な点が多いことがわかる。この原因については、コンクリートやセメントペーストなどを使用した加熱実験により検討を行う。

表-3 コアの圧縮強度・静弾性係数・中性化深さ

加熱温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	中性化深さ (mm)
未加熱	35.7	27.8	3.4
110	37.3	29.0	3.4
300	28.2	22.7	3.3
500	25.9	13.2	8.2
700	29.4*	20.3*	4.5

注：各試験結果は採取したコア 3 本の平均値。

*：加熱面から 60~80mm 部分の劣化が著しいため、80mm 以深のコアを成形して圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施。

4. 適用した非破壊試験の概要とその結果

本研究では、非破壊試験として表層透気試験および色彩測定を行った。いずれの方法も 4 体の試験体すべてにおいて加熱前と加熱後に測定を実施した。両方法の概要、測定方法および得られた結果を以下にそれぞれ示す。

4.1 非破壊試験の概要

(1) 表層透気試験

表層透気試験は、コンクリート構造物の耐久性評価の観点から、打ち込み、締固めおよび養生などが影響する表層コンクリートの粗密さを原位置で評価するものである。本研究では表層透気試験法のうち、ダブルチャンバー法（トレント法）を用いて、以下の式(1)により kT を算出した。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right) \frac{\omega}{2\varepsilon R_a} \left[\frac{\ln\left\{\frac{(P_a + \Delta P_i)}{(P_a - \Delta P_i)}\right\}}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (1)$$

ここで、 kT ：トレント法による表層透気係数 (m²)、 V_c ：内部チャンバーの容積 (m³)、 A ：内部チャンバーの断面積 (m²)、 ω ：空気の粘性係数 (N·s/m²)、 ε ：コンクリートの空隙率の想定値 (m³/m²)、 P_a ：大気圧 (N/m²)、 ΔP ：試験終了までの復圧量 (N/m²)、 t ：試験終了時間 (s)、 t_0 ：試験開始時間 (s)である。

測定箇所は、加熱面の有効加熱範囲 (670×670mm) をほぼ等分となるように 9 分割し、分割された各領域で測定した。加熱後の試験体に対しては、加熱範囲周辺の

状態を把握するため、有効加熱範囲外も併せて測定した。

(2) 色彩測定

コンクリートは火災などによって高温に曝されると、色彩が変化する²⁾が、その評価は観察者の主観によって行われる。また、実際の火災現場では、例えば、トンネルなどのナトリウム灯によって色彩の判断が難しい場合や開口部をベニヤ板などで遮ったマンションの一室などの暗い場所もあり、周辺の環境条件によっては色彩を把握することすら難しい場面がある。コンクリート表面の色彩は、コンクリート表面の受熱温度と関連があるため、これを適切に評価することは重要である。

本研究では、加熱面が受けた高温による色彩変化を定量化することを目的として、分光測色計を用いて色彩測定を行った。測定条件は、標準とする光源を D65（色温度：6504K）、分光感度を 2 度視野、拡散反射光のみを計測する正反射光成分除去（SCE）とし、L*a*b*表示系（JIS Z 8781-4）により数値化した。L*a*b*表色系は、現在、多様な分野において色管理などで最も用いられている表色系の一つであり、土木・建築分野の岩石の色彩に関する研究においても、この表色系が広く採用されている⁵⁾。図-5 に L*a*b*表示系の色空間立体イメージを示す。明度指数 L*とは、明度を表すパラメータであり 100 が白、0 が黒を表す。また、色相と彩度を示すクロマティックネスの a*は赤をプラス、緑をマイナスで表し、同指数の b*は黄をプラス、青をマイナスで表すパラメータである。それぞれ数値化した値から、式(2)より色差（ ΔE^*ab ）を算出した。ここで、 ΔE^*ab ：色差、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* ：加熱前と加熱後の各試験体の L*、a*、b*の変化量である。式(2)より、色差とは、加熱前の点から加熱後の点までの直線距離を示したものである。

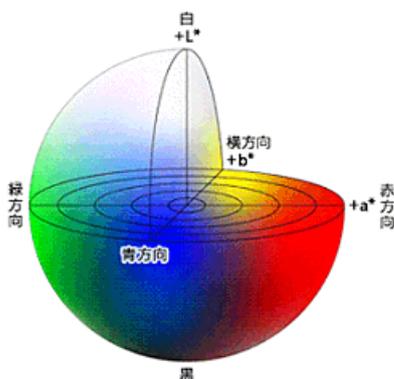


図-5 L*a*b*表色系の色空間立体イメージ⁶⁾

$$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2)$$

測定箇所は、写真-2 に示す A~Y の 25 箇所とし、1 箇所の測色点は互いに 30mm の間隔を持った 12 点に設定した。色彩測定の状況を写真-3 に示す。

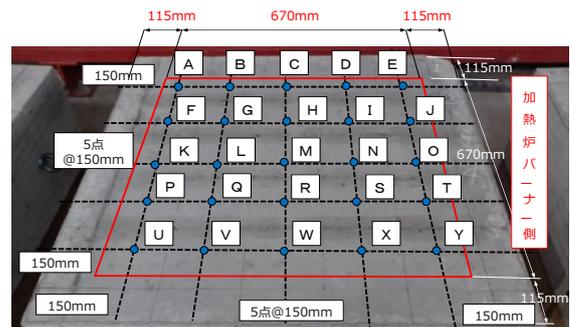


写真-2 分光測色計による測色位置



写真-3 分光測色計による色彩測定の状況

4.2 非破壊試験の結果

(1) 表層透気試験

加熱前後の kT 値の分布を図-6 に示す。各図の右側がバーナー位置となり、各図中に示す破線の範囲が有効加熱範囲である。また、表面ひび割れなどにより測定不可となった箇所については kT 値 1000 として作成した。

図-6 を概観すると、加熱を受けたものはいずれも加熱前と比較して、 kT 値は高い値を示した。110℃では測定位置によって kT 値に多少の差は認められたものの、高温加熱した際のような測定箇所による顕著な差とはならず、測定範囲全域においてほぼ同程度の kT 値を示した。加熱温度 300℃では、熱源に近い（図中右側）ほど kT 値は高い値を示した。なお、加熱温度 500℃および 700℃においては、写真-1 示すように、加熱後、目視により加熱面にひび割れが確認されており、それを含んだ測定位置では kT 値の測定は不可であった。なお、本実験の範囲内では熱源からの距離と kT 値の変化についての関係は明確ではなかった。図-7 は、 kT 値と加熱温度との関係を示す。図中のマークは平均値を、エラーバーは測定範囲における kT 値の最大・最小値を、また、加熱温度 20℃に示す kT 値は、加熱前の試験体 5 体で得られた結果をそれぞれ示している。なお、上述した通り、加熱温度 500℃および 700℃の条件においては、ひび割れによって加熱範囲全面に渡ってほぼ kT 値の測定は不可であった。そのため、加熱温度 500℃においては、参考値として測定できた値のみを図中に示した。図-7 より、加熱範囲にお

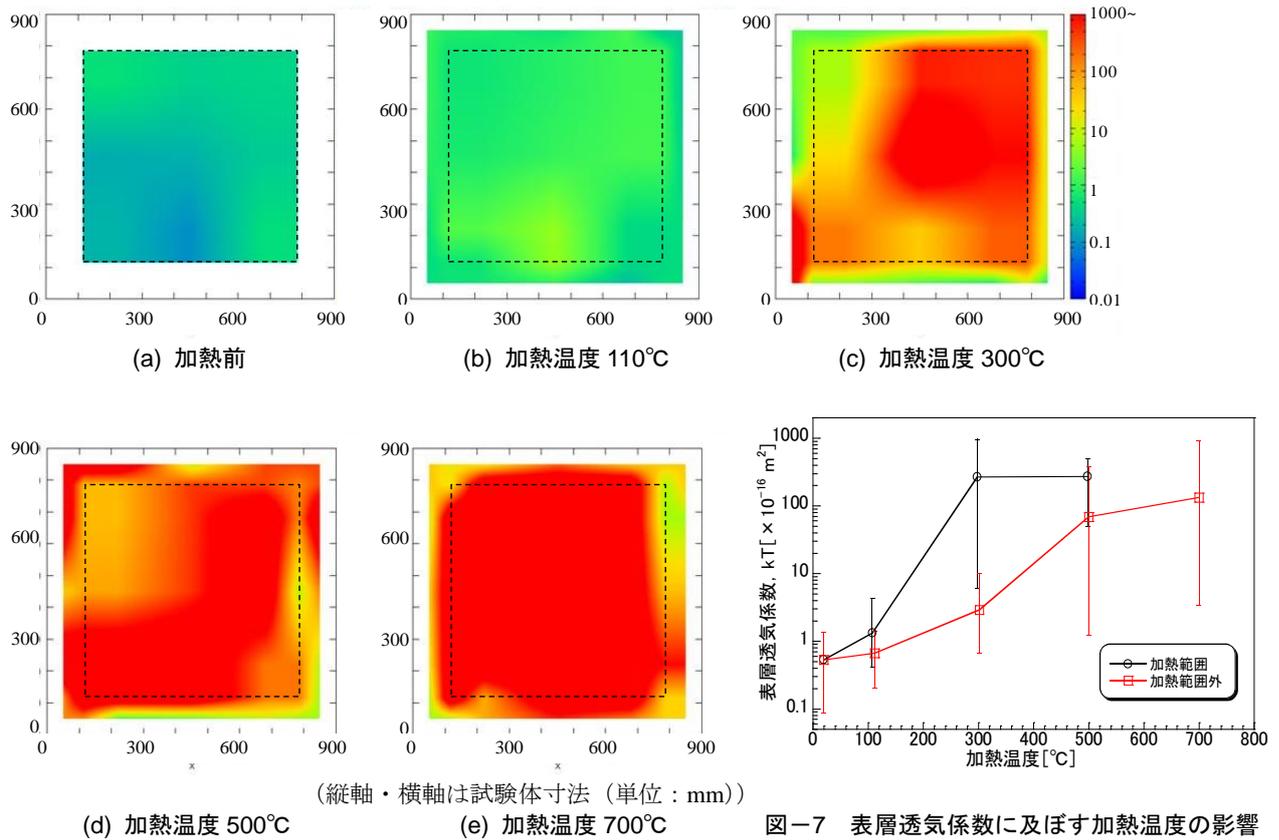


図-6 kT 値の分布

ける kT 値は、300°Cで著しく増加し、500°Cまでは一定であった。一方、加熱範囲外で測定を行った kT 値に着目すると、加熱温度 110°Cでは加熱前と同等、300~700°Cでは温度の上昇に伴い増加する傾向が示された。本実験では試験体の有効加熱範囲を一律に加熱しているため、 kT 値の変化と加熱箇所からの距離の関係について示すことは難しい。しかしながら、前述 (図-6) のように、バーナー側ほど kT 値が高い値を示す傾向にあること、および、加熱範囲近傍であっても直接加熱を受けない範囲での kT 値は、加熱範囲ほどの増加を示さない (図-7) ことから推察すると、加熱範囲の推定に、表層透気試験の適用できる可能性が示唆された。

以上の結果より、加熱を受けたコンクリートに対して、目視により加熱に伴うひび割れが明らかな、加熱温度 700°Cにおいては表層透気試験の適用は困難であることが明らかとなった。ただし、加熱温度 300°C程度までは、表面のひび割れを避けて測定すれば、表層透気試験は適用可能であった。測定した kT 値に着目すれば、加熱範囲の推定に適用できる可能性が示唆された。

(2) 色彩測定

加熱前および加熱後の加熱面の測色結果を図-8 に示す。ここでは、一例として、色相と彩度を示すクロマティックネス指数: a^* および b^* について考察する。図からいづれの試験体においても加熱前の a^* 値は-1~0、 b^* 値は2

~7 の範囲であったが、加熱後ではそれぞれの加熱温度に応じて、 a^* および b^* 値ともに変化した。具体的には、加熱温度 110, 300 および 500°Cでは、 a^* および b^* 値ともに増加傾向を示し、加熱面の赤みや黄みを捉えていることがわかる。一方、加熱温度が 700°Cでは、一部の測定箇所において a^* および b^* 値が減少し、とくに a^* 値は加

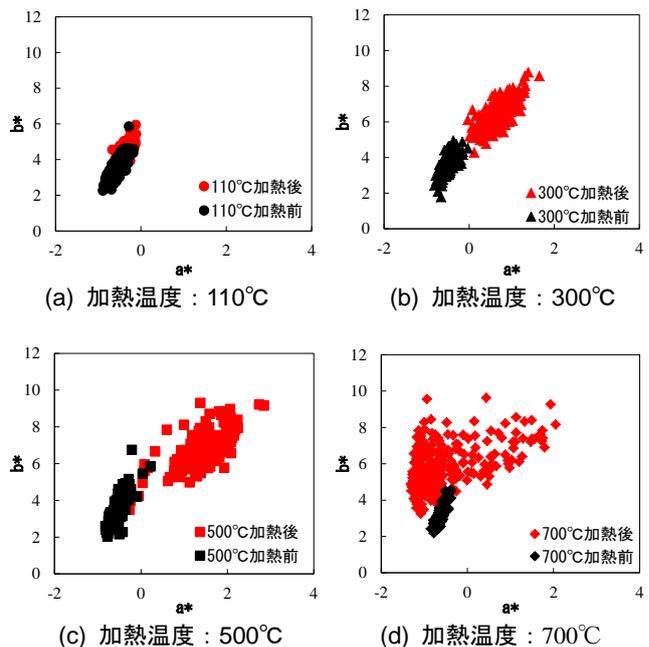


図-8 a^* および b^* 値の分布

熱前の色彩に戻る傾向を捉えた。この結果は著者の既往の研究成果⁷⁾とほぼ同様であった。また、これらの結果は、**写真-1**に示すコンクリート表面を目視で観察して変色状況を把握した結果と概ね一致した。

図-9は、L*a*b*表示系により数値化した結果から求めた色差を示す。図中に示す色差(●印)は、いずれの加熱温度の場合も、**写真-2**のA~Y(25箇所)で得られた平均値を示し、エラーバーはその標準偏差を示している。図から、色差は加熱温度110℃で1.2、300℃で3.1、500℃で4.0、700℃で5.8であり、加熱温度が大きくなると色差も増加した。このことから、色差は加熱温度と関係があることが明らかとなった。加熱面における色彩測定から色差を求めることで、加熱温度を把握できる可能性が示された。また、これらは著者の研究成果⁷⁾とほぼ一致していた。今後は、コンクリートの種類なども検討ケースとして含め、データを蓄積し、色差測定から得られる色差の適用可能性を検討する。

本結果から、色相と彩度を示すクロマティックネス指数: a^* および b^* 値によって加熱温度毎の加熱面の色を定量的に捉えることができた。さらに得られた測色結果(L^* , a^* , b^*)から色差(ΔE^*ab)を求めることにより、コンクリート表面の加熱温度を把握できる可能性があることを示唆した。

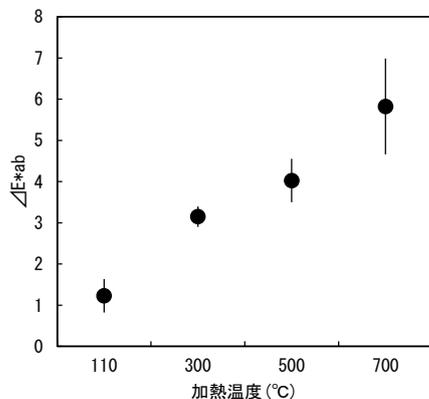


図-9 色差 (ΔE^*ab) と加熱温度との結果

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 表層透気試験により得られた kT は、加熱温度300℃で著しく大きくなり、500℃程度までは一定であった。さらに、700℃では、加熱面に生じたひび割れの影響によって測定が困難であった。
- (2) 目視によりひび割れが生じていない加熱範囲外では、加熱温度の上昇に伴い、表層透気係数が増加するものの、加熱の有無ほどの増加ではなかった。
- (3) 加熱面の色彩測定により得られた a^* および b^* 値か

ら、加熱に伴うコンクリート表面の変色を定量的な数値として示すことができた。

- (4) L*a*b*表示系から求めた色差 (ΔE^*ab) の平均値は加熱温度と相関があり、加熱温度110℃~700℃までの範囲において、コンクリート表面の加熱温度を推定できる可能性を有している。

今後は、加熱条件(温度上昇勾配、最高温度、加熱保持時間、冷却速度など)をパラメータとして、更なるデータの蓄積が必要となる。さらに、表層透気試験では評価される箇所において、深度方向の損傷評価や、加熱後のコンクリートの物性と関連付けた検討が、色彩測定では加熱を受けたコンクリートの劣化範囲推定に向けて、その適用範囲を検討することが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B)25289132, 研究代表者:大阪大学大学院 鎌田敏郎, 研究分担者:立命館大学 内田慎哉, 大阪大学大学院 寺澤広基)の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術¹⁶[基礎編], pp.57-60, 2016
- 2) 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
- 3) 阪口明弘, 春畑仁一, 皿井剛典:火害を受けたコンクリート構造物の劣化診断手法の検討 その1 実験概要と加熱試験および破壊試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.233-234, 2012
- 4) 春畑仁一, 阪口明弘, 皿井剛典:火害を受けたコンクリートの劣化診断手法の検討 その2 コンクリート表面の非破壊・微破壊試験および破壊試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.125-126, 2013
- 5) 満下淳二, 石沢一吉, 遠藤 可, 武内俊昭:岩石の色彩測定と風化区分および物性値評価への応用に関する検討, 応用地質, Vol.38, No.6, pp.376-385, 1998
- 6) コニカミノルタ株式会社カラーマネジメント画面L*a*b*表色系の色空間立体イメージ参照: https://www.konicaminolta.jp/about/research/inkjethead/color_management.html
- 7) 正木智大, 春畑仁一:火害を受けたコンクリート構造物の劣化診断手法の検討 その2 コンクリート色彩に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.215-216, 2016