

# 報告 火害を受けたコンクリートの反発度・反発速度・機械インピーダンス・接触時間による劣化状態の評価方法の検討

春畑 仁一<sup>\*1</sup>・内田 慎哉<sup>\*2</sup>・岩野 聡史<sup>\*3</sup>・池田 憲一<sup>\*4</sup>

**要旨：**本研究では、ガス加熱炉により加熱温度を 500℃まで上昇、その後、加熱温度を 1 時間および 4.5 時間保持（加熱継続時間）することにより、火害の程度を人工的に変化させたコンクリート試験体を 2 体作製し、それら試験体の加熱面において、反発度、反発速度、機械インピーダンスおよび接触時間に基づく方法をそれぞれ適用して、火害による劣化状態を評価する方法としての適用可能性について検討した。その結果、反発速度、機械インピーダンスおよび接触時間に基づく方法において、加熱の有無や加熱継続時間の違いによる火害の劣化程度の差異を評価できる可能性があることを明らかにした。

**キーワード：**コンクリート、火害、非破壊試験、反発度、反発速度、機械インピーダンス、接触時間

## 1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに火害がある<sup>1)</sup>。火害を受けたコンクリートに対しては、補修・補強などの対策の要否を判定するための調査・診断が有効であると考えられ、これまで様々な検討がされている<sup>2), 3)</sup>。火害を受けたコンクリートの劣化状態を非破壊で評価する試験方法には、例えば、色彩測定や表層透気試験<sup>4)</sup>、反発度や機械インピーダンスに基づく方法<sup>5)</sup>、衝撃弾性波に基づく方法<sup>6), 7)</sup>などがある。しかしながら、コンクリートの火害劣化に関する研究および調査事例の報告は、凍害や塩害といった他の劣化現象と比較すると極めて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、ガス加熱炉により加熱温度を 500℃まで上昇させた状態で 1 時間および 4.5 時間その温度を継続させることにより、火害の程度を人工的に変化させたコンクリート試験体を 2 体作製し、それらの加熱面において反発度、反発速度、機械インピーダンスおよび接触時間に基づく方法それぞれを適用して、火害による劣化状態を評価する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

試験体の形状は図-1 に示すように、長さ 900mm、幅 900mm、厚さ 250mm の直方体であり、これを 2 体作製した。加熱後の試験体の移動を考慮して、加熱面から深さ 165mm の位置に用心鉄筋（異形棒鋼(呼び名：D13)）をロの字状に 4 本配置した（図-1 参照）。コンクリート

は、生コン工場で製造した呼び強度：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：3.16g/cm<sup>3</sup>）、水：地下水、細骨材：大分県津久見市産砕砂（表乾密度：2.68g/cm<sup>3</sup>、粗粒率：2.85）および京都府亀岡市産砕砂（表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>、粗粒率：2.85）、粗骨材：京都府亀岡市産砕石（表乾密度：2.68g/cm<sup>3</sup>、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 9.0cm、空気量 4.1%である。強度試験用の円柱供試体は、材齢

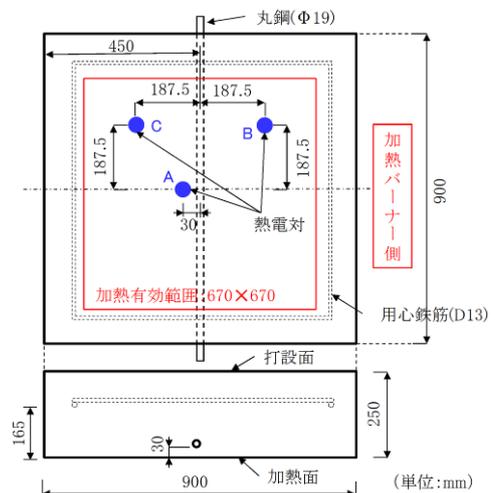


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

表-1 コンクリートの配（調）合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		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 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 リック (株) 技術研究所課長 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)

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結果、圧縮強度は $32.4\text{N/mm}^2$ であった。加熱試験用の試験体は室内気中養生をした後、材齢7日で脱型し、加熱試験に供するまで屋内で静置した。なお、加熱時のコンクリートの温度履歴を把握するため、図-1に示す3箇所に加熱面から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

試験体の加熱には図-2に示すガス加熱炉を使用した。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試験体を設置した。ガス加熱炉の熱源は都市ガス（ $46090\text{kJ/m}^3$ ）とし、ISO834の標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、図-1に示すコンクリート表面から0mmにある3本の熱電対で測定した温度の平均値が $500^\circ\text{C}$ となるまで各試験体を加熱した。この温度を本研究では加熱温度と呼ぶ。その後、火害劣化の程度に差異を設けるため、加熱温度を約 $500^\circ\text{C}$ 一定とした上で、1.0時間継続（以下、加熱継続時間とする）して加熱する試験体と、加熱継続時間：4.5時間の試験体の2ケースを設定（以下、試験体名称を1.0h試験体、4.5h試験体とする）した。なお、加熱試験日での試験体材齢は1.0h試験体が184日、4.5h試験体が107日である。加熱終了後は、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1.0h試験体で $38^\circ\text{C}$ 、4.5h試験体で $63^\circ\text{C}$ になるまで加熱炉上に静置した。

## 2.3 加熱試験中の炉内およびコンクリートの温度履歴

各試験体で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3本の熱電対での同一深さで計測した温度の平均値である。図-3より、加熱継続時間は1.0h試験体で1.0時間、4.5h試験体で4.5時間となっていることがわかる。

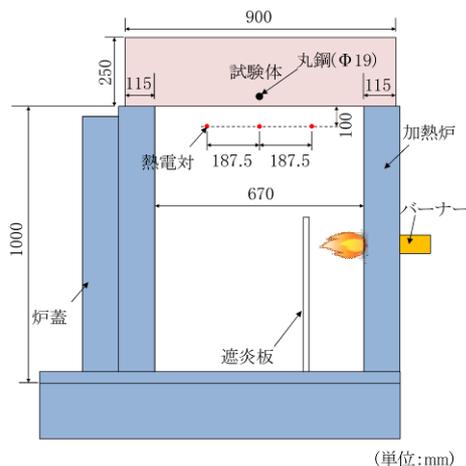
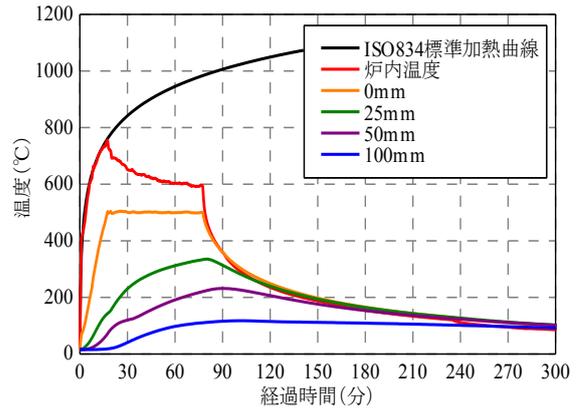
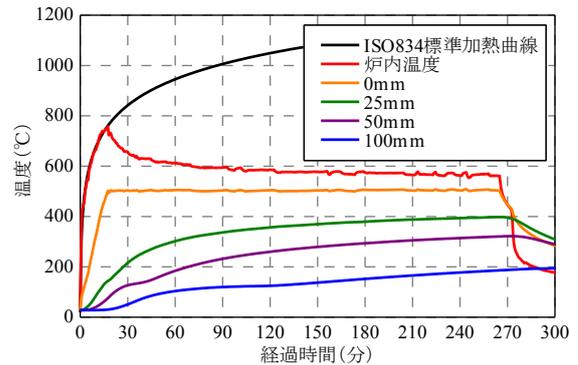


図-2 ガス加熱炉の概要



(a) 1.0h 試験体



(b) 4.5h 試験体

図-3 試験体の温度履歴

## 3. 加熱後に試験体から採取したコアの圧縮強度・静弾性係数

加熱後の各試験体からコア（直径100mm）を3本ずつ採取した。採取日は、非破壊試験による測定が終了した翌日（加熱試験日の翌々日）である。採取したコアの圧縮強度試験および静弾性係数の測定結果を表-2に示す。また、比較のため試験体作製時に併せて作製した円柱供試体（未加熱）でも4.5h試験体から採取したコアと同日に、圧縮強度および静弾性係数の試験をそれぞれ行った。表-2より、加熱により圧縮強度および静弾性係数は低下し、加熱継続時間が長くなることによって、両物性値がより低下していることが確認された。

表-2 コアの圧縮強度・静弾性係数

試験体名称	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	静弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )
1.0h試験体	21.5	17.6
4.5h試験体	20.4	14.5
円柱供試体	32.4	31.5

注：各試験結果は採取したコア3本の平均値。

## 4. 適用した非破壊試験の概要

本研究では、反発度、反発速度、機械インピーダンスおよび接触時間に基づく方法をそれぞれ適用した。いず

この方法においても、1.0h 試験体では加熱前および加熱後の加熱面、4.5h 試験体では加熱後の加熱面に対して測定した。各非破壊試験の概要を以下にそれぞれ示す。なお、いずれの方法においても、測定箇所は加熱面の有効加熱範囲（670×670mm）内であり、写真-1に示すA～Oの15箇所とした。

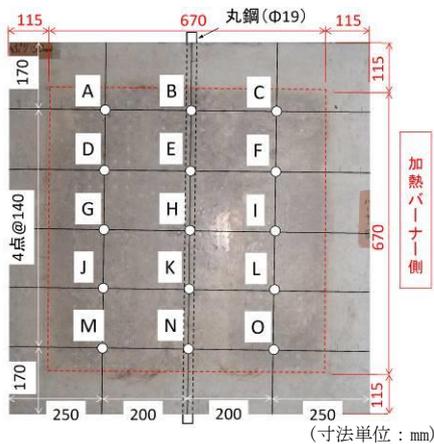


写真-1 各種非破壊試験の測定箇所

#### 4.1 反発度に基づく方法

反発度は、JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」に規定されているリバウンドハンマー（N型）によって測定した。打撃は、写真-2に示すように、鉛直下向きに行った。A～Oに示す各箇所（写真-1参照）での反発度の決定は、以下に示す手順で行った。まず、各箇所それぞれにおいて、互いに30mmの間隔をもった20点の測定を行った。その後、測定値を昇順に並び替え、一番大きい値から6個、一番小さい値から5個をそれぞれ棄却し、9点の平均値を算出した。この値をA～Oに示す各箇所での反発度として決定した。したがって、1供試体で得られる反発度の数は15個となる。



写真-2 リバウンドハンマーによる測定状況

#### 4.2 反発速度に基づく方法

反発速度は、写真-3に示す反発速度測定装置により、打撃直前と直後の速度を光学的にそれぞれ測定した。ここでの指標値としては、両速度の百分率（反発速度比<sup>8)</sup>）を用いた。なお、打撃箇所、打撃点数、打撃方向、反発速度比の算出手順は、反発度に基づく方法と同じである。



写真-3 反発速度測定装置による測定状況

#### 4.3 機械インピーダンスに基づく方法

機械インピーダンスは、NDIS 3434-3「コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第3部：機械インピーダンス試験方法」<sup>9)</sup>に基づき測定した。測定状況を写真-4に示す。機械インピーダンス： $Z$ は、式(1)によって定義され、打撃体がコンクリートに衝突したときに、発生した力： $F$ とその結果生じる力と同じ方向の速度： $V$ の比である。

$$Z = \frac{F}{V} \quad (1)$$

ここで、コンクリート表層部分が完全弾性体と仮定し、質量： $M$ の打撃体が速度： $V_A$ でコンクリート表面に衝突する現象を考える（図-4参照）。打撃体の衝突によってコンクリートに弾性変形が生じると、エネルギー保存の法則から、

$$\frac{1}{2}MV_A^2 = \frac{1}{2}kd^2 \quad (2)$$

が成立する。ここで、 $k$ ：コンクリートのバネ係数、 $d$ ：



写真-4 機械インピーダンスの測定状況

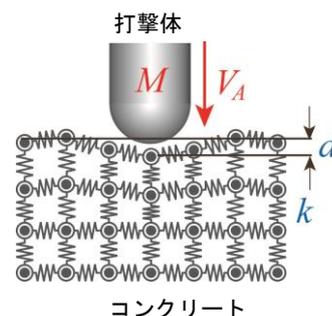


図-4 コンクリートと打撃体の衝突モデル

打撃体の衝突によって生じるコンクリートの変位である。また、コンクリート表層部分を完全弾性体と仮定しているため、フックの法則により次式が成立する。

$$F = kd \quad (3)$$

式(3)を  $d$  について解き、これを式(2)に代入し整理すると、

$$\sqrt{Mk} = \frac{F_{\max}}{V_A} \quad (4)$$

が得られる。ここで、 $F$  の添字  $\max$  は、最大値であることを示している。式(1)と(4)より、 $\sqrt{Mk}$  が機械インピーダンスの物理的意味であり、コンクリート表層部分の機械的な動きにくさを示す指標である。ただし、通常、打撃によりコンクリート表層部分は塑性変形をするため、機械インピーダンスとしては、貫入過程および反発過程の機械インピーダンスがそれぞれ定義される。ここで、**図-5** に、打撃体でコンクリート表面を打撃した際の打撃波形の例を示す。この打撃波形は、打撃体として加速度センサを内蔵したハンマ（**写真-4** 参照）を使用した場合に、加速度センサで受信した時刻歴波形である。図中に示す  $V_1$ （打撃速度）は、ハンマがコンクリート表面に衝突した時刻： $T_1$  からコンクリートの抵抗を受けてハンマが停止する時刻： $T_2$  までの時間（打撃時間）において加速度を打撃時間で積分した値である。一方、 $V_2$ （反発速度）は、 $T_2$  からハンマがコンクリートの反発力を受けて加速度がゼロとなる時刻： $T_3$  までの時間（反発時間）において加速度を反発時間で積分した値である。コンクリートは完全弾性体ではないため、 $V_1$  と  $V_2$  は異なる値となり、 $V_1$  には塑性変形分が含まれ、 $V_2$  には塑性変形後の弾性変形のみが反映された値となる。前者を用いて算出した機械インピーダンスは貫入過程の機械インピーダンス： $Z_A$  であり、後者は反発過程の機械インピーダンス： $Z_R$  と定義される。これらの算出式を以下にそれぞれ示す。

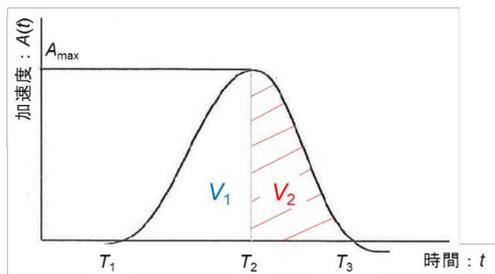


図-5 打撃波形の例（機械インピーダンス）

$$Z_A = \frac{F_{m \ a}}{V_1} \approx \frac{MA_{m \ a \ x}}{\left( \int_{T_1}^{T_2} A(t) dt \right)^{1.2}} \quad (5)$$

$$Z_R = \frac{F_{m \ a}}{V_2} \approx \frac{MA_{m \ a \ x}}{\left( \int_{T_2}^{T_3} A(t) dt \right)^{1.2}} \quad (6)$$

ここで、 $F_{max}$ ：最大打撃力、 $A_{max}$ ：最大加速度、 $A(t)$ ：打

撃力波形である。なお、式中のベキ乗値 1.2 は、速度補正係数である。

測定に使用したハンマは、質量 380g、球冠半径 30mm である。ハンマに内蔵した加速度センサの周波数範囲（±1dB）は 0.4～10000Hz である。計測におけるサンプリング時間間隔は 0.5μs に設定した。なお、打撃箇所、打撃点数、打撃方向、機械インピーダンス： $Z_A$  および  $Z_R$  の算出手順は、反発度に基づく方法と同じである。

#### 4.4 接触時間に基づく方法

接触時間は、NDIS 3434-2「コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第 2 部：接触時間試験方法」<sup>10)</sup> に準拠して測定した。測定状況を**写真-5**に示す。接触時間は、加速度センサを内蔵したハンマでコンクリート表面を打撃したときに、ハンマがコンクリートに接触している時間である。測定で得られる打撃波形の例を**図-6**に示す。

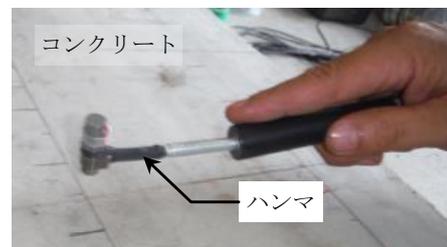


写真-5 接触時間の測定状況

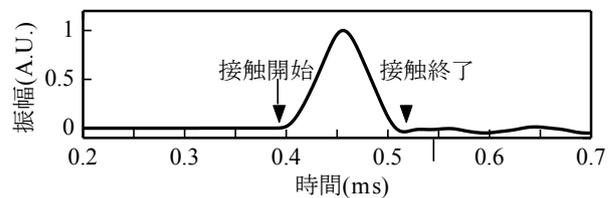


図-6 打撃波形の例（接触時間）

ハンマとコンクリートが接触すると加速度計に加速度が生じて振幅値が大きくなり、接触が終了すると振幅値は接触開始前と同程度となる。打撃波形において、接触が開始した時刻から振幅値が最大値となる時刻までがハンマがコンクリート表面に貫入している時間： $t_m$ 、振幅値が最大値となる時刻から接触を終了した時刻までがハンマがコンクリート表面から反発している時間： $t_R$  となる。測定される接触時間は両者の和となる。また、貫入および反発している時間は、コンクリートの弾性係数  $E$  とブリネル硬さ  $H_B$  と式(7)、式(8)に示す関係にある。

$$t_m = \sqrt{\frac{m}{8RH_B}} \quad (7)$$

$$t_R = \frac{1}{4} \sqrt{2m} \left( \frac{1}{RE} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (8)$$

ここで、 $R$ ：ハンマの半径、 $m$ ：ハンマの質量、 $H_B$ ：ブリ

ネル硬さ,  $E$ : コンクリートの弾性係数,  $\nu$ : コンクリートのポアソン比である。式(7), 式(8)より, 質量と半径の比 ( $m/R$ ) が同一のハンマでは, 接触時間はコンクリートの弾性係数とブリネル硬さを反映する。

測定に使用したハンマは, 質量 18g, 球冠半径 7.5mm である。ハンマに内蔵した加速度センサの周波数範囲 ( $\pm 1\text{dB}$ ) は 0.4~10000Hz である。計測におけるサンプリング時間間隔は 0.5 $\mu\text{s}$  に設定した。なお, 打撃箇所, 打撃点数, 打撃方向, 接触時間の算出手順は, 反発度に基づく方法と同じである。

## 5. 適用した非破壊試験の結果

### 5.1 反発度に基づく方法

図-7 に, 加熱前および加熱後の各試験体で得られた反発度の結果を示す。図に示す反発度は, 加熱前および加熱後に関わらず 15 箇所 (写真-1 の A~O) で求めた反発度の平均値であり, エラーバーはその標準偏差を示す。図より, 加熱後の反発度は, 加熱前より大きな値となった。特に, 加熱継続時間が長くなると反発度は小さくなる傾向を示した。一方, 試験体の圧縮強度および静弾性係数は, 表-3 に示すとおり, 500 $^{\circ}\text{C}$ の加熱を受けると低下し, 加熱継続時間が長くなることでさらに低下したことから, 反発度の測定結果とは異なる傾向を示した。なお, 1.0h 試験体の反発度が加熱前のそれよりも大きくなる結果については, 既往の研究結果<sup>5)</sup>にみられる 500 $^{\circ}\text{C}$ 加熱における反発度の測定結果と同様であった。この原因については引き続き検討を重ねて明らかにしていく予定である。

### 5.2 反発速度に基づく方法

図-8 に, 加熱前および加熱後の各試験体で得られた反発速度比の結果を示す。図に示す反発速度比は, 加熱前および加熱後に関わらず 15 箇所 (写真-1 の A~O) で求めた反発速度の平均値であり, エラーバーはその標準偏差を示す。図より, 加熱後の反発速度比は, 加熱前より低下し, その加熱継続時間が長くなることでさらに低下した。この結果は, 加熱後の試験体の圧縮強度および静弾性係数 (表-3 参照) と同じ傾向を示していた。

### 5.3 機械インピーダンスに基づく方法

図-9 および図-10 に, 加熱前および加熱後の各試験体で得られた機械インピーダンス:  $Z_A$ ,  $Z_R$  の結果を示す。図に示す  $Z_A$ ,  $Z_R$  は, 加熱前および加熱後に関わらず 15 箇所 (写真-1 の A~O) で求めた  $Z_A$ ,  $Z_R$  の平均値であり, エラーバーはその標準偏差を示す。図-9 および図-10 より, 機械インピーダンス

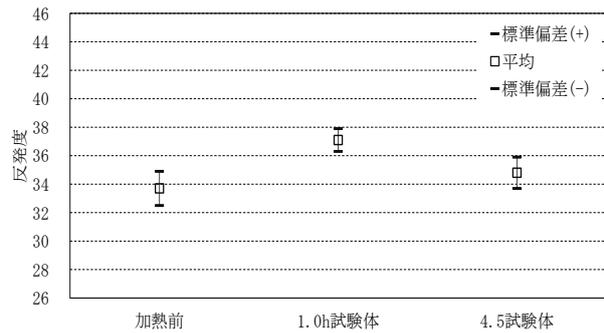


図-7 反発度の平均値と標準偏差

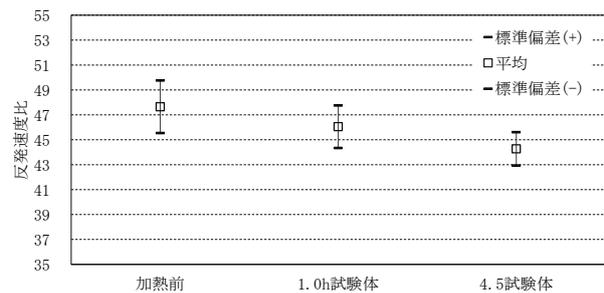


図-8 反発速度の平均値と標準偏差

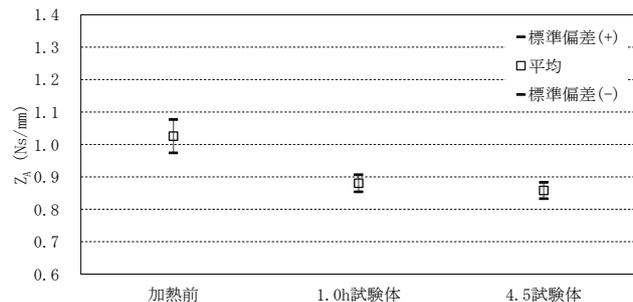


図-9 機械インピーダンス:  $Z_A$  の平均値と標準偏差

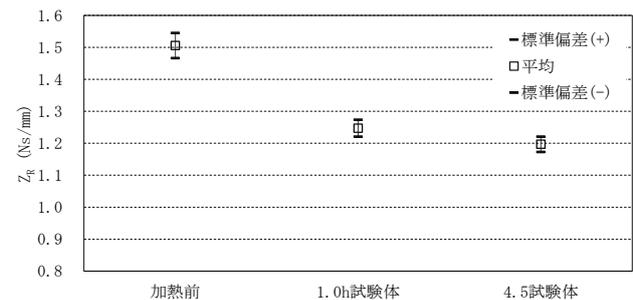


図-10 機械インピーダンス:  $Z_R$  の平均値と標準偏差

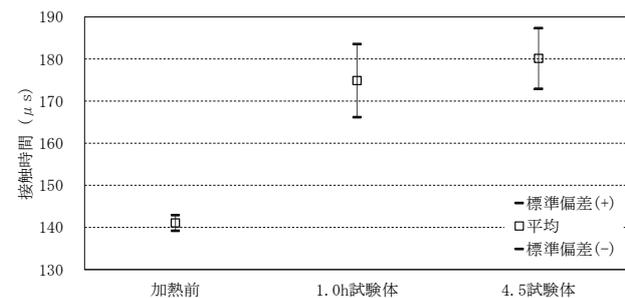


図-11 接触時間の平均値と標準偏差

は、加熱前は  $Z_A$  : 1.03Ns/mm,  $Z_R$  : 1.51 Ns/mm, 1.0h 試験体は  $Z_A$  : 0.88 Ns/mm,  $Z_R$  : 1.25 Ns/mm であった。この結果は、既往の研究成果<sup>5)</sup>と概ね一致していた。4.5h 試験体の機械インピーダンス :  $Z_A$ ,  $Z_R$  では、1.0h 試験体と比較して、それぞれ 1 割程度低下した。式(4)から、機械インピーダンスはコンクリートのバネ係数を反映した指標である。また、表-2 から、加熱継続時間が増加すると静弾性係数は低下する。したがって、加熱継続時間の増加に伴い、コンクリート表層の静弾性係数は低下し、その結果、機械インピーダンス :  $Z_A$ ,  $Z_R$  が小さくなったと考えられる。

#### 5.4 接触時間に基づく方法

図-11 に、加熱前および加熱後の各試験体で得られた接触時間の結果を示す。図に示す接触時間は、加熱前および加熱後に関わらず 15 箇所(写真-1 の A~O) で求めた接触時間の平均値であり、エラーバーはその標準偏差を示す。図より、接触時間は加熱前 : 141  $\mu$ s, 1.0h 試験体 : 175  $\mu$ s, 4.5h 試験体 : 180  $\mu$ s であった。なお、加熱前および 1.0h 試験体は、既往の研究成果<sup>6)</sup>と同じ傾向を示していた。これらの結果から、接触時間は加熱継続時間によって増加することがわかる。表-2 から、加熱継続時間が増加すると静弾性係数は低下する。このことから、本測定結果から、加熱継続時間の増加によるコンクリート表層の静弾性係数の低下を反映していると考えられる。

#### 6. まとめ

本研究で得られた結論を示す。

- (1) 反発度は、加熱温度 500°Cにおいて加熱前の反発度より大きくなった。一方、同加熱温度で 4.5 時間加熱継続した場合は、1 時間加熱継続の反発度より小さくなった。
- (2) 反発速度比は、加熱温度 500°Cにおいて加熱前の反発速度比より小さくなった。さらに、同加熱温度で 4.5 時間加熱継続した場合は、1 時間加熱継続の反発速度より小さくなった。
- (3) 機械インピーダンス :  $Z_A$ ,  $Z_R$  は、加熱温度 500°Cにおいて加熱前の  $Z_A$ ,  $Z_R$  より小さくなった。さらに、同加熱温度で 4.5 時間加熱継続した場合は、1 時間加熱継続の  $Z_A$ ,  $Z_R$  より小さくなった。
- (4) 接触時間は、加熱温度 500°Cにおいて加熱前の接触時間より長くなった。さらに、同加熱温度で 4.5 時間加熱継続した場合は、1 時間加熱継続の接触時間よりさらに長くなった。
- (5) 上記(1)~(4)より、反発速度比、機械インピーダンスおよび接触時間に基づく方法を用いることにより、加熱継続時間の違いによって生じた劣化状態を

とらえることが可能であった。このことから、同方法は、本研究の範囲内において、火害劣化の評価手法として適用可能であることが明らかとなった。

#### 謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会 2016 年度 研究助成(研究代表者 : 立命館大学 内田慎哉)の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

#### 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) 日本コンクリート工学会 : 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報告書, 2017.9
- 4) 春畑仁一, 迫井裕樹, 内田慎哉, 池田憲一 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1075-1080, 2017.7
- 5) 内田慎哉, 春畑仁一, 小松由弥, 池田憲一 : 反発度および機械インピーダンス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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1903-1908, 2017.7
- 6) 岩野聡史, 内田慎哉, 春畑仁一, 渡部 正 : 弾性波法で得られた接触時間・伝搬時間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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1915-1920, 2017.7
- 7) 大野健太郎, 前田祐輔, 内田慎哉, 春畑仁一 : 弾性波の速度構造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検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1909-1914, 2017.7
- 8) 小松由弥, 内田慎哉, 野崎 峻, 三谷宗平 : 反発度・反発速度比・機械インピーダンス・弾性波伝搬速度によるコンクリートの圧縮強度評価の相互比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1963-1968, 2017.7
- 9) NDIS 3434-3<sup>:2017</sup> : コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第 3 部 : 機械インピーダンス試験方法, 日本非破壊検査協会, 2017
- 10) NDIS 3434-2<sup>:2017</sup> : コンクリートの非破壊試験—打撃試験方法—第 2 部 : 接触時間試験方法, 日本非破壊検査協会, 2017