

# 報告 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

内田 慎哉\*1・春畑 仁一\*2・小松 由弥\*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、非破壊試験として反発度および機械インピーダンス  $Z_A$  および  $Z_R$  に基づく方法をそれぞれ適用し、火害による劣化評価手法としての適用可能性について検討した。その結果、いずれの非破壊試験も、火害による劣化評価手法としての適用可能であることが明らかとなった。また、本研究で設定した加熱温度 (110, 300, 500, 700℃) に対して適用できる範囲が広い非破壊試験は、 $Z_R$  を評価指標とした機械インピーダンスに基づく方法であることもわかった。

**キーワード：**コンクリート, 劣化, 火害, 非破壊試験, リバウンドハンマー, 反発度, 機械インピーダンス

## 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>。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<sup>2)</sup>」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 にいく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反発度および機械インピーダンスに基づく方法をそれぞれ適用し、火害による劣化評価手法としての適用可能性について検討するとともに、各非破壊試験で得られた加熱後の指標値が加熱前と比較して低下する加熱温度の範囲についても言及した。

## 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 に示すとおり、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

3.15g/cm<sup>3</sup>)、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 2.56g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.80) および京都府亀岡市産砕砂 (表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.85)、粗骨材：京都府亀岡市産碎石 (表乾密度 2.67g/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 8.5cm、空気量 3.6% である。打設後、強度試験用の円柱供試体について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 31.4N/mm<sup>2</sup> であった。一方、試験

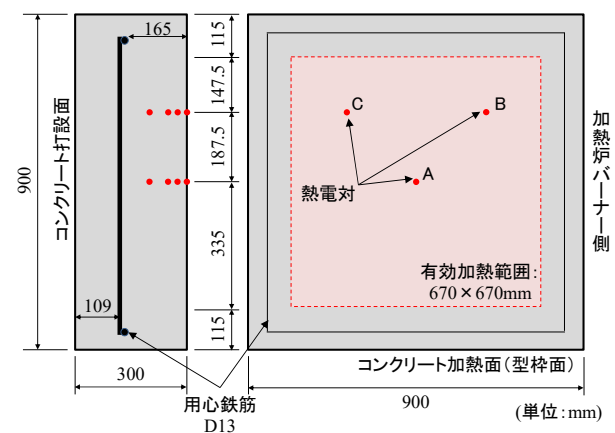


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

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 |

\*1 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)

\*2 (一財) 日本建築総合試験所 試験研究センター (正会員)

\*3 立命館大学 理工学部環境システム工学科 (学生会員)

\*4 東京理科大学 国際火災科学研究科教授 博士(工学)

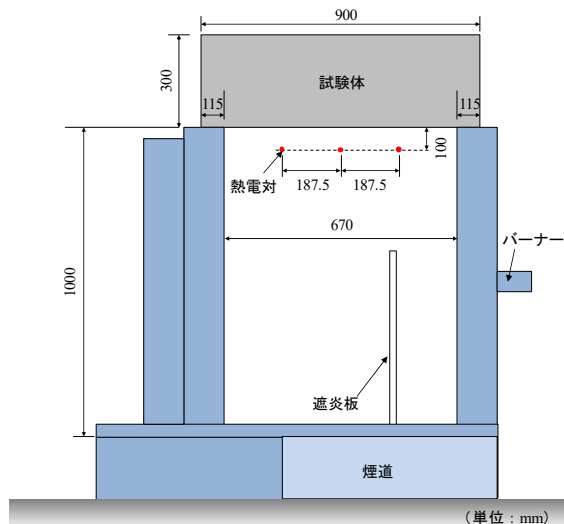


図-2 加熱試験の概要

体は、室内気中養生した後、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(有効加熱範囲:長さ670mm×幅670mm)が炉内に接するように設置した。

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/m<sup>3</sup>)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-3より、60分間にわたって設定した加熱

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     |

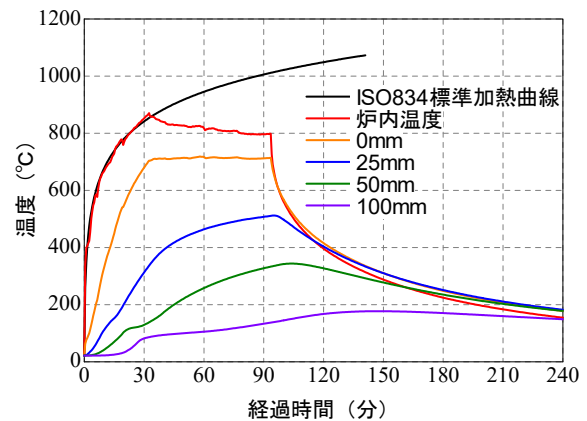


図-3 加熱温度700℃の試験体における温度履歴

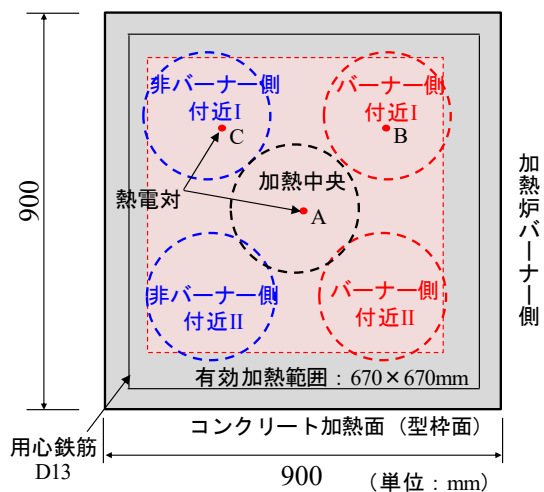


図-4 コンクリートコアの採取位置

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-1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。

## 3. 加熱後の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。

表－3 コアの圧縮強度・静弾性係数・中性化深さ

| 加熱温度<br>(℃) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 中性化深さ<br>(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。

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。

### 3.2 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℃ の中性化深さについては加熱温度 700℃ より大きい結果となり、既往の研究結果<sup>3)</sup>と同様の傾向を示した。この原因については、更なる検討を要する。

## 4. 適用した非破壊試験の概要とその結果

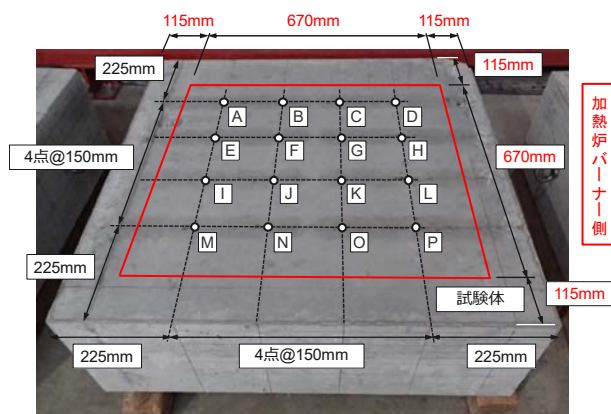
本研究では、反発度に基づく方法および機械インピーダンスに基づく方法をそれぞれ適用した。いずれの方法も 4 体の試験体全てにおいて加熱前と加熱後に測定を行っている。両方法の試験概要および結果を以下に示す。

### 4.1 非破壊試験の概要

#### (1) 反発度に基づく方法

各加熱温度の試験体の反発度は、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（NR 型）によって測定した。いずれの試験体においても、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～P の 16 箇所とした。1 箇所での測定打撃点数は、互いに 30mm の間隔をもった 16 点に設定した。なお、打撃は、写真－2 に示すように、鉛直下向きに行った。

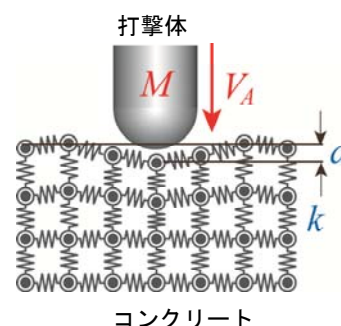
各箇所（写真－1 中の A～P）の反発度は、以下に示す



写真－1 リバウンドハンマーによる測定箇所



写真－2 リバウンドハンマーによる測定状況



図－5 コンクリートと打撃体の衝突モデル

手順により求めた。すなわち、測定した 16 点の反発度を昇順に並べ、一番大きい反発度から 4 個、一番小さい反発度から 3 個をそれぞれ除き、9 点の平均値を算出した。この値を各箇所での反発度とした。したがって、1 供試体で得られる反発度の数は 16 個となる。

#### (2) 機械インピーダンスに基づく方法<sup>4)</sup>

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－5 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、 $d$ ：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、

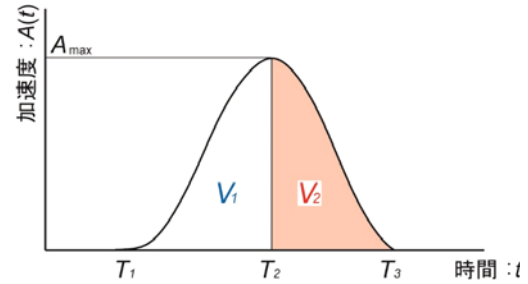
$$\sqrt{Mk} = \frac{F_{\max}}{V_A} \quad (4)$$

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、 $Mk$  の平方根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－6 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ー（写真－3 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、ハンマー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ーが停止する時刻  $T_2$  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、 $T_2$  からハンマー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場合は貫入過程  $Z_A$ 、後者は反発過程  $Z_R$  の機械インピーダンスとそれぞれ定義される。これらの算出式を以下に示す。

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

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

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、式中のべき乗値 1.2 は、速度補正係数である。



図－6 打撃波形の例



写真－3 ハンマーによる打撃状況

各加熱温度の試験体の機械インピーダンス  $Z_A$  および  $Z_R$  の測定に使用したハンマーは、質量 380g、先端の球面半径 30mm である。測定状況を写真－3 に示す。なお、測定箇所、測定打撃点数、打撃方向、 $Z_A$  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。

## 4.2 非破壊試験の結果

### (1) 反発度に基づく方法

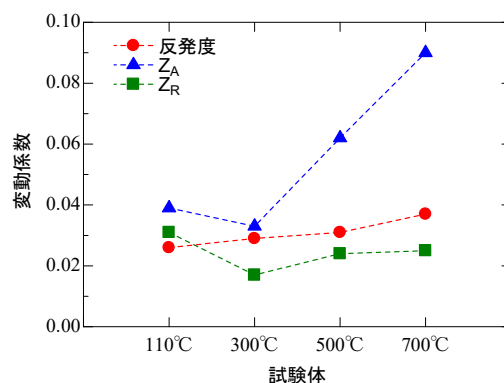
図－7 に、加熱前および加熱後の各試験体で得られた反発度を加熱温度と併せて示す。なお、図－7 (a) に示す加熱前の加熱温度は、加熱試験においてガス加熱炉で加熱する温度（加熱温度）のことであり、この図に示す反発度を得た時点では、試験体の加熱は行っていない。したがって、加熱前と加熱後において加熱温度が同じ値のものは、同一の試験体となる。また、図に示す反発度は、いずれの場合においても、写真－1 に示す A～P で求めた 16 箇所の反発度の平均値であり、エラーバーはその標準偏差を示している。図より、加熱前の反発度は、いずれの試験体においても平均値で 38 程度と同じ値であり、標準偏差は 1.0～1.4 と小さい。これに対して、加熱後の反発度は、加熱温度 110℃、300℃および 500℃で加熱前のそれよりも大きくなり、加熱温度 700℃で加熱前の反発度よりも小さな値となった。既往の研究成果<sup>5)</sup>では加熱温度が大きくなると反発度が小さくなることが示されており、本研究で得られた傾向と大きく異なった。

図－8 に変動係数を示す。加熱前および加熱後ともにいずれの加熱温度においても 4%より小さい値となった。

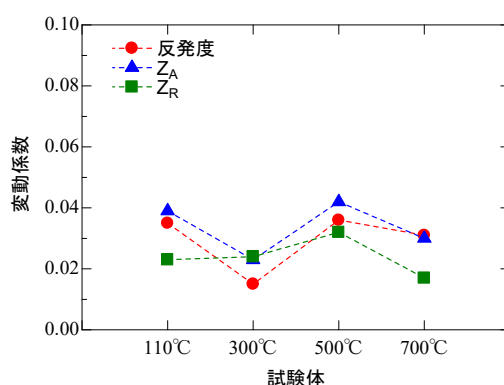
## (2) 機械インピーダンスに基づく方法

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  $Z_A$  および  $Z_R$  を加熱温度と併せて示す。また、図に示す  $Z_A$  および  $Z_R$  は、いずれの場合においても、写真-1 に示す A~P で求めた 16 箇所 で求めた  $Z_A$  および  $Z_R$  のそれぞれの平均値であり、エラーバーはその標準偏差を示している。図-9 および図-10 を比較すると、加熱前の  $Z_A$  および  $Z_R$  は、いずれの試験体においても概ね一定の値であることがわかる。これに対して、加熱後の  $Z_A$  および  $Z_R$  は、 $Z_A$  の場合で加熱温度 500℃、 $Z_R$  の場合で 300℃において、加熱前のそれぞれの値よりも小さくなった。また、上記に示すそれぞれの加熱温度よりも温度が高い領域では、加熱温度が大きくなると  $Z_A$  および  $Z_R$  とともに線形で小さくなっていくことがわかる。式(4)から明らかとなっており、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-3 に示すとおり、加熱温度が大きくなると静弾性係数は小さくなる。したがって、加熱によりコンクリート表層部分の弾性係数が低下し、その結果、 $Z_A$  および  $Z_R$  が小さくなったと考察できる。なお、加熱により  $Z_A$  および  $Z_R$  が低下する現象は、著者の既往の研究成果<sup>9)</sup>と一致している。

図-8 に  $Z_A$  および  $Z_R$  の変動係数を示す。加熱前の試

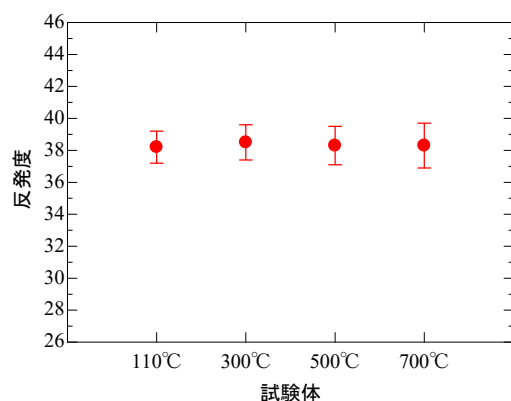


(a) 加熱前

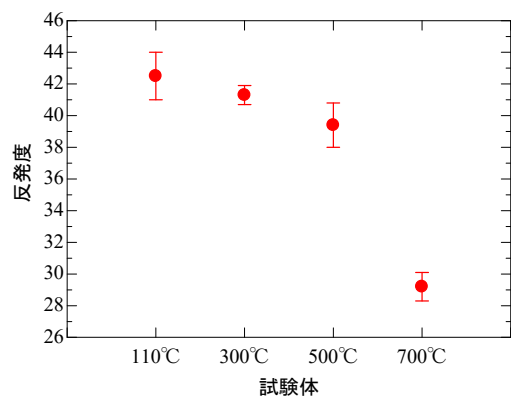


(b) 加熱後

図-8 変動係数

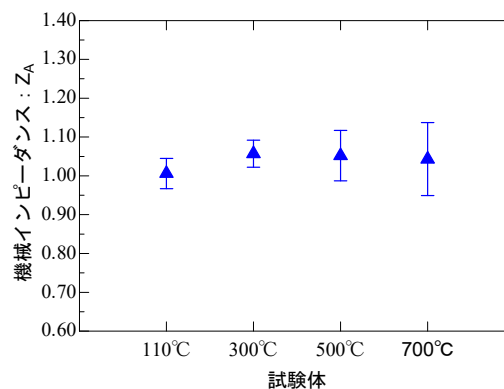


(a) 加熱前

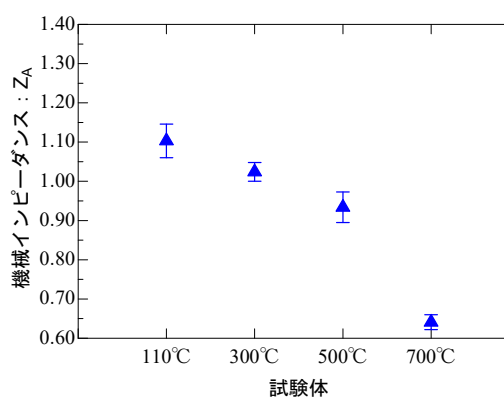


(b) 加熱後

図-7 反発度の測定結果

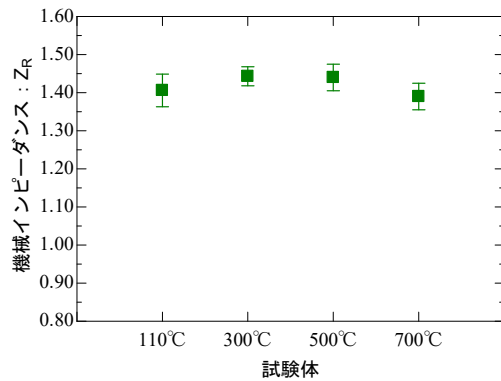


(a) 加熱前

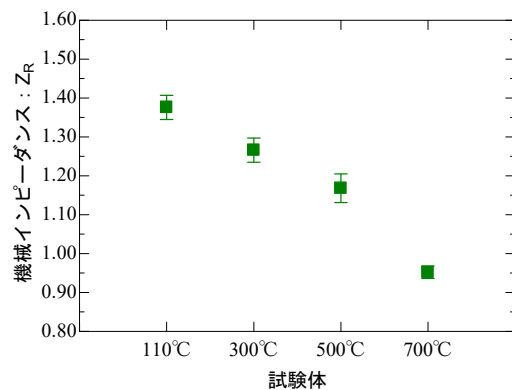


(b) 加熱後

図-9 機械インピーダンス :  $Z_A$  の測定結果



(a) 加熱前



(b) 加熱後

図-10 機械インピーダンス:  $Z_R$ の測定結果

験体と比較すると、 $Z_A$ の変動係数が最も大きく、 $Z_R$ は反発度のそれと概ね同じ値であった。一方、加熱後の試験体では、加熱温度に関わらず  $Z_A$  および  $Z_R$  とともに 4%程度と小さく、反発度の変動係数と同様の値であった。

##### 5. 各非破壊試験で得られた加熱後の指標値が加熱前と比較して低下する加熱温度の範囲

火害により劣化したコンクリートの面的な領域を評価する手法として、図-11に各非破壊試験で得られた加熱後の指標値が加熱前と比較して低下する加熱温度の範囲を示す。図より、今回設定した加熱温度に対して適用できる範囲が広い非破壊試験は、 $Z_R$ を評価指標とした機械インピーダンスに基づく方法であることが明らかとなった。ただし、反発度が増加する現象、 $Z_A$  および  $Z_R$  が低下し始める加熱温度が異なる理由など、未だ不明確な部分が多い。今後は、さらにデータを蓄積し、理論的に現象を解明する予定である。

##### 6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 反発度は、加熱温度 110, 300, 500°Cにおいて加熱前の反発度より大きくなった。一方、加熱温度が 700°Cの場合は加熱前の反発度より小さくなった。

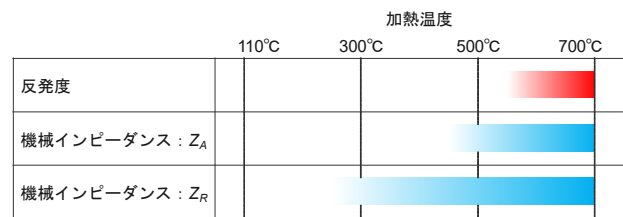


図-11 各非破壊試験で得られた加熱後の指標値が加熱前と比較して低下する加熱温度の範囲

- (2) 機械インピーダンス  $Z_A$  は、加熱温度が 500°C～700°Cにおいて、加熱温度が大きいほど小さくなった。
- (3) 機械インピーダンス  $Z_R$  は、加熱温度が 300°C程度から 700°Cにおいて感度を有する評価指標である。
- (4) 上記(1)～(3)より、反発度および機械インピーダンス  $Z_A$  および  $Z_R$  に基づく方法いずれも火害による劣化評価手法として適用可能である。
- (5) 今回設定した加熱温度に対して適用できる範囲が広い非破壊試験は、 $Z_R$ を評価指標とした機械インピーダンスに基づく方法である。

##### 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)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) 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
- 4) 内田慎哉, 山下健太郎：コンクリート構造物の点検における評価対象別の非破壊試験 ①コンクリート品質(強度)・部材厚さ・かぶり(厚さ), コンクリート工学, Vol.53, No.6, pp.570-577, 2015.6.
- 5) 春畑仁一, 阪口明弘, 山根政夫, 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1366-1371, 2014
- 6) 内田慎哉ほか：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範囲の非破壊評価手法に関する基礎的研究, 平成 28 年度全国大会 土木学会第 71 回年次学術講演会, 第 V 部門, pp.931-932, 2016