

# 報告 表面波の伝播特性に着目したコンクリート火害劣化の評価に関する基礎的研究

寺澤 広基\*1・鎌田 敏郎\*2・春畑 仁一\*3・内田 慎哉\*4

**要旨：**火害を受けたコンクリートの劣化を的確に判断することは、合理的な補修・補強方法を検討する上で重要である。本研究では、加熱温度の異なる複数のコンクリート試験体を対象に衝撃弾性波法の計測を実施し、表面波の伝播特性に着目した音響伝達関数および表面波速度による火害劣化の評価を試みた。その結果、音響伝達関数では 300℃以上、表面波速度では 500℃以上の加熱の影響を評価できる可能性が示された。

**キーワード：**コンクリート, 劣化, 火害, 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 音響伝達関数, 表面波速度

## 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<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意識が高まっている。

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、劣化は火災によってもたらされるという災害の要素が大きいため、研究および調査事例が報告されるケースは少ないのが現状である。

このような背景を受けて、本研究では、ガス加熱炉により火害の程度が異なる複数のコンクリート試験体を人工的に作製し、加熱面において衝撃弾性波法による計測を行い、表面波の伝播特性に着目した火害の劣化評価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、レディーミクストコンクリート(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:京都府亀岡市産砕石(表乾密度:

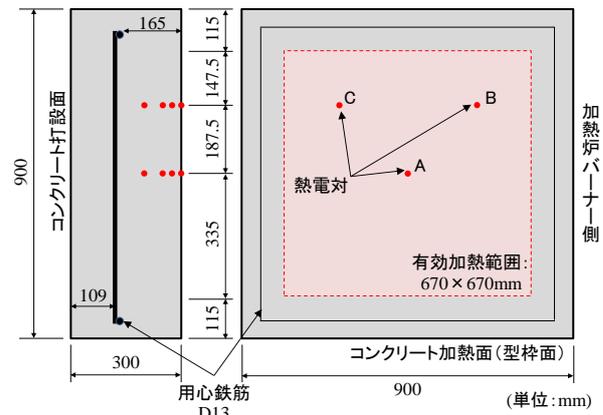


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

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

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, 100mmの位置にK熱電対をそれぞれ設置した。

\*1 大阪大学 大学院工学研究科助教 工博 (正会員)

\*2 大阪大学 大学院工学研究科教授 工博 (正会員)

\*3 (一財) 日本建築総合試験所 試験・研究センター 構造部 耐震耐久性調査室 (正会員)

\*4 立命館大学 理工学部 環境システム工学科講師 工博 (正会員)

## 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。

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。

## 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。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日でコアを採取した。

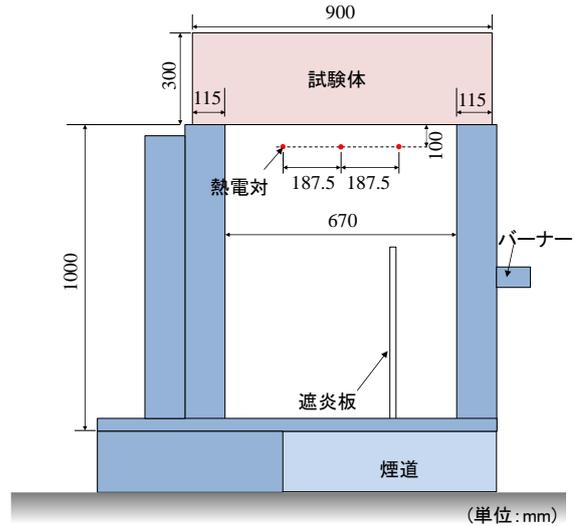


図-2 加熱試験の概要

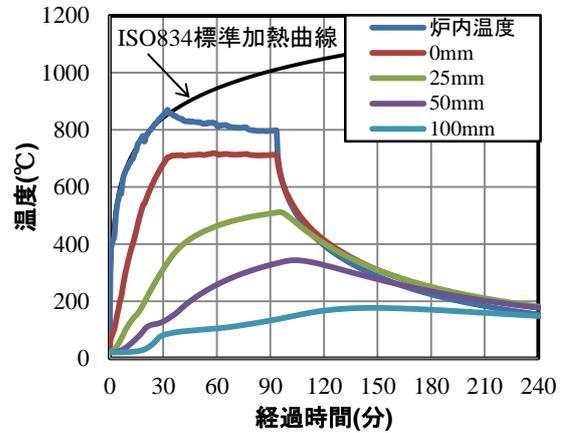


図-3 加熱温度700℃の試験体における温度履歴

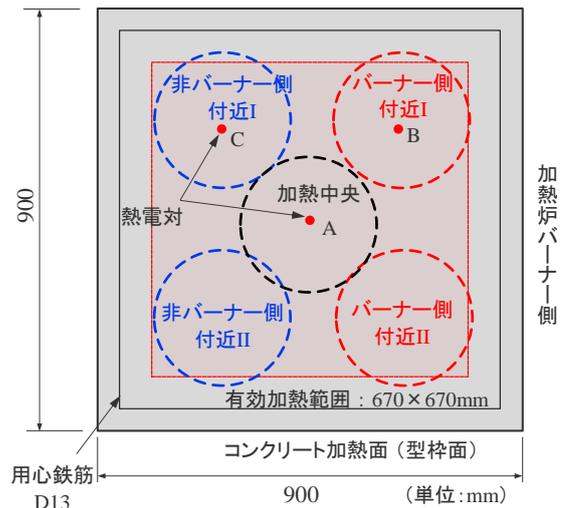


図-4 コンクリートコアの採取位置

### 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」、静弾

表-2 試験体の加熱時材齢とコア採取箇所・本数

加熱温度 (°C)	加熱時の材齢 (日)	コア採取箇所・本数		
		パーナー側付近	加熱中央	非パーナー側付近
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

性係数は JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」、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。ここで、加熱温度 700°C の場合については、加熱面から 80mm 以下の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した。また、コアの採取位置による各試験結果の差異は小さかったため、表-3 では 3 回の平均を示している。加熱温度 110°C では未加熱のものと比較して圧縮強度および静弾性係数に大きな違いはなく、加熱温度が 300°C を超えると、どちらも低下していくことが確認できる。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り、既往の研究成果<sup>3)</sup>と同様の傾向を示した。この原因については、さらなる検討を要する。

#### 4. 衝撃による表面波の伝播挙動に着目した評価

##### 4.1 実験概要

加熱温度の違いが衝撃による表面波の伝播挙動に与える影響を把握するため、衝撃弾性波法による測定を行った。測定状況を写真-1 に示す。衝撃の入力には鋼球を用いた。使用した鋼球径は 6mm, 10mm および 19mm の 3 種類で、6mm および 10mm の鋼球については電磁ソレノイドによる機械的入力を行い、19mm の鋼球については人力による入力を行った。弾性波の受信には 3Hz~30kHz の範囲でフラットな応答感度を有する加速度センサを使用し、弾性波入力位置から 40mm 離れた位置から 40mm の等間隔で 6 つのセンサを直線状に設置した。センサの設置にはブチルゴム系の両面テープを使用した。サンプリング周波数は 1MHz, サンプリング点数は 10000 点の条件で加速度の時刻歴応答を記録した。

図-4 に測定箇所を示す。試験体加熱面の外周から 75mm ずつ離れた位置の 750×750mm の範囲内に 150mm 毎に格子状の測線を引いた。衝撃入力点に一番近いセンサ（以下、衝撃入力点に近い順に S1, S2 とする）の位置を測線が交差する点とした。1 つの試験体につき 16 箇所測定し、1 箇所につき 4 回ずつ測定を行った。ここで、鋼球径 6mm および 19mm については、加熱温度 110°C, 300°C, 未加熱の試験体の測線 3 での加熱後および加熱温

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 <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	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



写真-1 衝撃弾性波法の測定状況

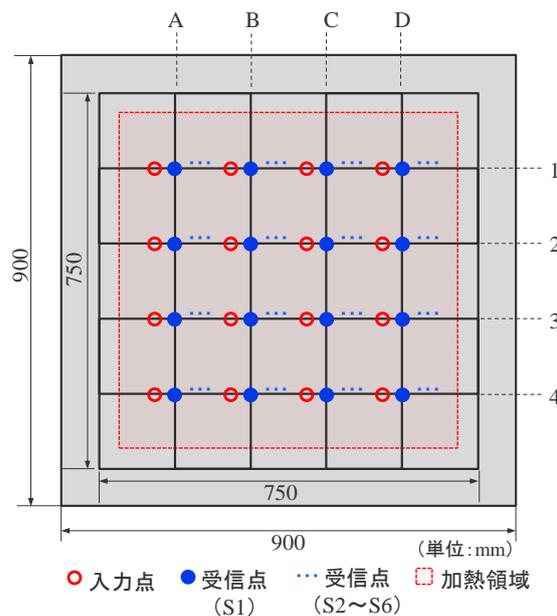


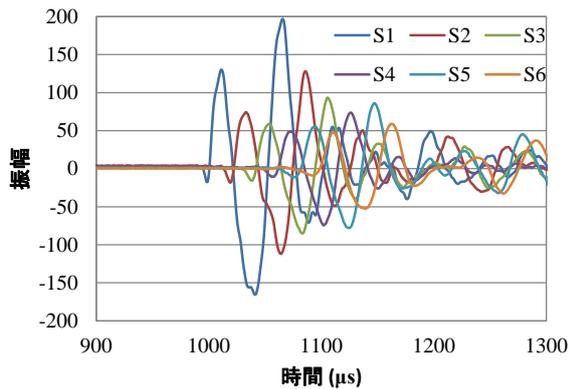
図-4 測定箇所

度 700°C の試験体の測線 2, 測線 3 での加熱前後のみ実施した。

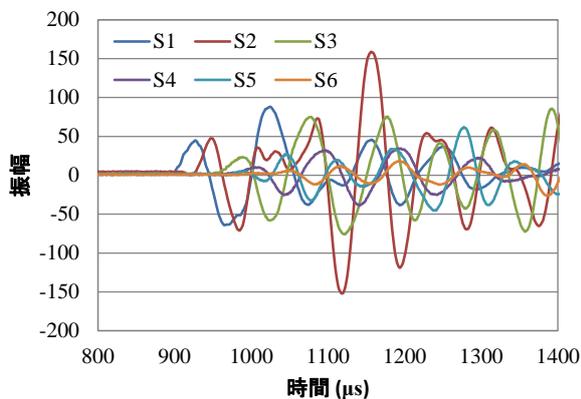
##### 4.2 測定結果および評価方法

###### (1) 加熱による加速度時刻歴波形への影響

図-5 に鋼球径 10mm で衝撃を入力し、得られた加速度時刻歴波形の一例を示す。図-5(a)は未加熱の試験体の A-1 点（図-4 参照）、図-5(b)は加熱温度 300°C の試験体の A-4 点の結果である。図-5(a)より、S1 の受信後から約 200μs の間でほぼ同じ形状の表面波が各セン

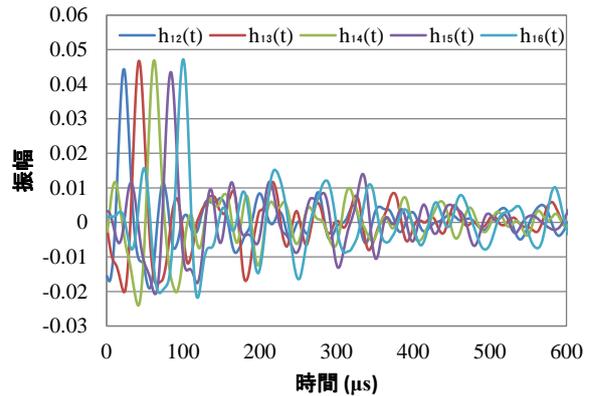


(a) 未加熱の試験体での測定結果

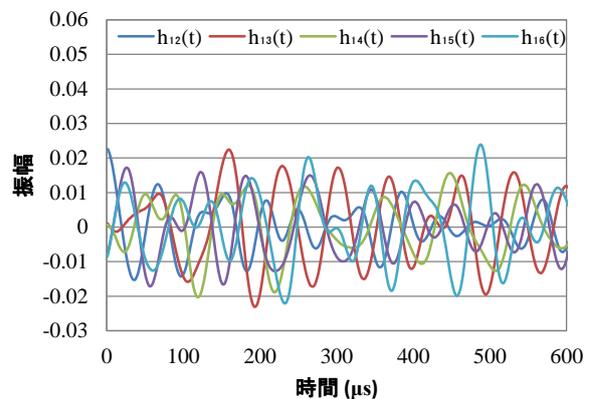


(b) 加熱後の試験体での測定結果

図-5 加速度時刻歴波形一例



(a) 未加熱の試験体での算出結果



(b) 加熱後の試験体での算出結果

図-6 時刻歴インパルス応答一例

サ位置を伝播していく様子が確認できる。一方、図-5(b)ではセンサごとに測定された波形の形状が異なることから、加熱によりコンクリート表面の伝播特性が変化したと考えられる。加熱の影響を評価するにあたり、本研究では音響伝達関数の時刻歴インパルス応答と表面波速度に着目して測定結果を整理した。

## (2) 評価指標

まず、音響伝達関数およびそのインパルス応答の算出方法について述べる。S1~S6 で得られた受信波形  $y_1(t) \sim y_6(t)$  から式(1)を用いて音響伝達関数  $H(\omega)$  を算出する。

$$H_{1n}(\omega) = Y_n(\omega) / Y_1(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $n$ : センサ位置、 $Y_n(\omega)$ :  $y_n(t)$  のフーリエ変換である。この音響伝達関数  $H(\omega)$  をフーリエ逆変換することでインパルス応答  $h(\omega)$  が算出できる。図-5 の加速度時刻歴波形から算出したインパルス応答を図-6 に示す。図-5(a)のように形状の似た2つの波形を用いた場合、インパルス応答は図-6(a)に示すように鋭いピークを持つ形状となる。一方、図-5(b)のように2つの波形の相関が低い場合、図-6(b)に示すように鋭いピークのないインパルス応答となる。インパルス応答の形状の差を、既

往の研究<sup>4)</sup>で用いられている式(2)の指標を用いて評価を行う。

$$R = \sum_{t=0}^{4096} \{h_{1n}(t) - h'_{1n}(t)\}^2 \quad (2)$$

ここで、本研究では  $h_{1n}(t)$ : 加熱前の試験体のインパルス応答、 $h'_{1n}(t)$ : 加熱後または未加熱の試験体のインパルス応答とした。また、2つのインパルス応答の相関が最大となるよう振幅を実数倍した後、残差の二乗和を1で正規化した。

表面波速度の算出については、S1~S6のセンサ毎に、振幅の最大値の10%より大きく、かつ正負が同じピークが最初に計測された時間を表面波の到達時間とし、センサ間距離(40mm)を各センサでの表面波の到達時間の差で除した値を用いた。

## 4.3 音響伝達関数による評価

### (1) インパルス応答の算出に使用するセンサ位置

音響伝達関数のインパルス応答の算出には最低2点での時刻歴波形が必要である。ここで、表面波は波長が短いほど、より表層を伝播する成分が多いことから、加熱により変状を生じたコンクリートでは波形の出力点が近

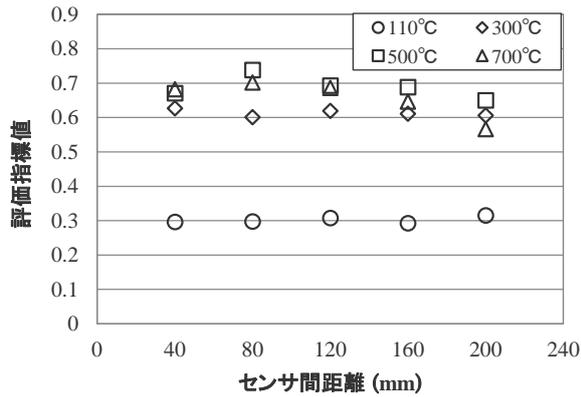


図-7 センサ間距離と評価指標値の関係

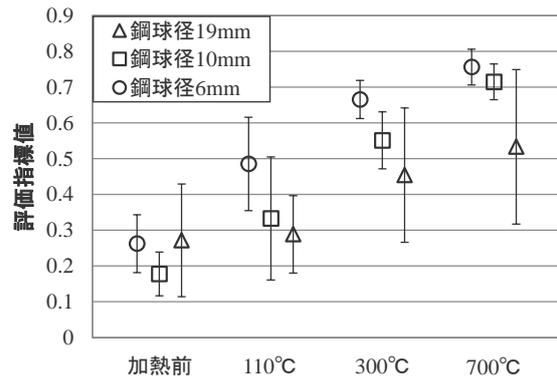


図-9 鋼球径と評価指標値の関係

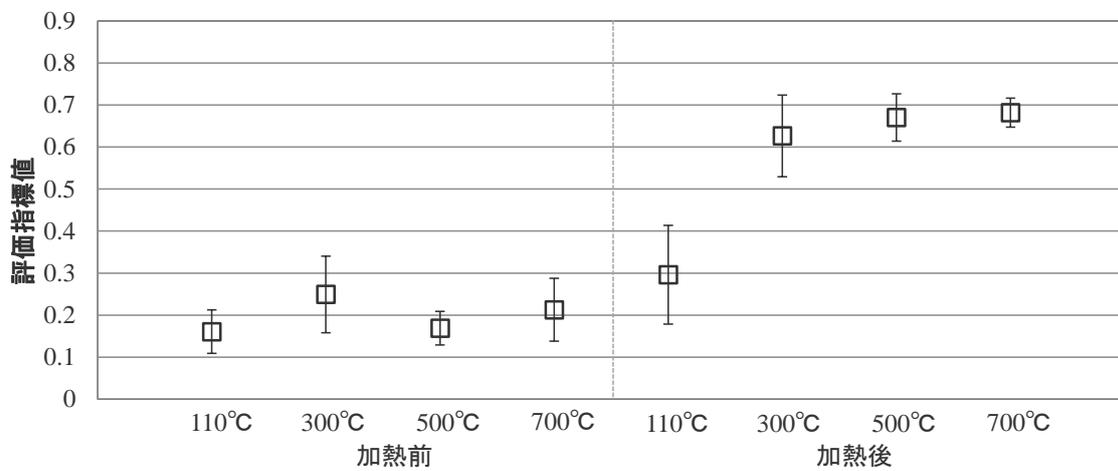


図-8 加熱による評価指標値への影響

いほど評価指標値が大きく、出力点が遠くなるにつれて未加熱の指標値に近づくと予想される。

そこで、打撃点から最も近いS1とS2～S6の組合せによる評価指標値の関係を調べた。加熱前後での評価指標値をセンサ間距離ごとに算出した結果を図-7に示す。鋼球径は10mmを使用し、試験体毎に測定箇所16点を4回ずつ測定した結果から算出した平均値を示している。図-7より、加熱温度700°Cの試験体以外ではセンサ間距離による評価指標値の変化はほとんど見られなかった。以降の評価指標値はS1とS2を用いて算出した結果を示すものとする。

### (2) 加熱前後での評価指標値

加熱温度毎の評価指標値の変化量の平均値および標準偏差を図-8に示す。鋼球径は10mmを使用し、加熱前の評価指標値は加熱を行わない試験体にて同一箇所での計測を行った結果より算出した。加熱前の評価指標値は0.15～0.25程度である。加熱温度が高くなるほど評価指標値の値も大きくなり、加熱温度300°C以上では平均値で0.6以上となっている。

### (3) 異なる鋼球径での評価指標値

入力する周波数の違いによる影響を調べるため、打撃の鋼球径を変えて計測した結果から評価指標値を算出した。得られた平均値および標準偏差を図-9に示す。ここで、図-9は図-4の測線3で各4回ずつ計測した結果を示しており、加熱温度700°Cの試験体にて、加熱前に測線3で計測した結果を $h_{in}(t)$ 、測線2で計測した結果を $h'_{in}(t)$ として評価指標値を算出している。径19mmの鋼球を使用した結果に着目すると、加熱温度110°Cの評価指標値は加熱前とほぼ同じ値となっており、加熱温度300°C以上のケースで評価指標値が大きくなっている。これは3.2で言及したコアの圧縮強度および静弾性係数と加熱温度の関係と相関のある結果となった。一方、径6mmの鋼球を使用した結果では、加熱温度110°Cのケースでも評価指標値が加熱前より大きくなっており、鋼球径が小さいほど、この傾向が顕著である。この理由としては、径の小さい鋼球ほど、出力される弾性波の成分として高周波成分を多く含んでおり、評価指標値が加熱により生じたコンクリートのひび割れなどの変状の影響を

受けやすいためと考えられる。

以上の結果より、比較的大きい径の鋼球を衝撃の入力に使用し、音響伝達関数の時刻歴インパルス応答から算出される評価指標値を用いることで、300℃以上の加熱により生じる劣化を把握できる可能性があると考えられる。実際の火害調査で使用する場合は、火災による劣化が生じていないコンクリート部分でインパルス応答を把握することで、本手法を適用できると考えられる。ただし、今回の実験では鋼球径 19mm の衝撃入力的人力で行ったため、機械的入力を行った鋼球径 6mm、10mm の結果と比較して測定結果のばらつきが大きくなっており、適用可能性については更なる検討が必要である。

#### 4.4 表面波速度による評価

加熱後および未加熱の試験体に対し、鋼球径 10mm で衝撃を入力した測定結果から表面波の到達時間を算出した。なお、S4～S6 での測定結果において、衝撃入力点から遠いセンサのほうが近いセンサより到達時間が早くなったケースが一部確認され、加熱温度が高くなるほどこの傾向が見られた。これは、試験体の厚さが 300mm であることから、入力点から遠いセンサほど加熱面の反対側の面で反射した弾性波の到達が測定結果に強く表れたためと考えられる。そのため、表面波速度の算出には S1・S2 間および S2・S3 間で算出された到達時間差の平均を用いることとした。

算出された表面波速度の平均値および標準偏差と試験体の加熱条件との関係を図-10 に示す。加熱温度 110℃および 300℃では、未加熱の表面波速度とほぼ同じ値となった。加熱温度が 300℃以上では表面波速度の算出結果のばらつきが大きくなっているが、加熱温度 500℃および 700℃では表面波速度の低下が確認された。よって、表面波速度では 500℃以上の加熱の影響を評価できる可能性があると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、火害を模擬したコンクリート試験体に対して、衝撃弾性波法による計測を行い、表面波の伝播特性に着目して加熱の影響の評価を試みた。主な結果は以下の通りである。

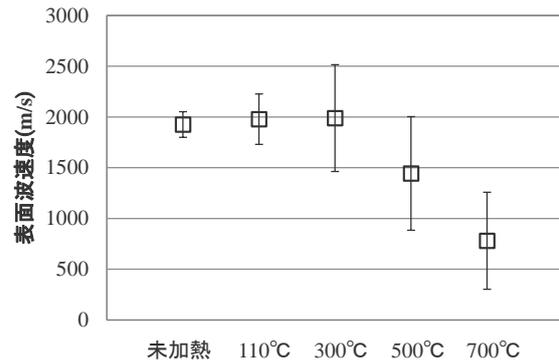


図-10 加熱温度と表面波速度の関係

- (1) 音響伝達関数による評価方法では、径の大きい鋼球を衝撃入力に用いることで、300℃以上の加熱の影響を評価できる可能性がある。
- (2) 表面波速度では、500℃以上の加熱の影響を評価できる可能性がある。

#### 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。また、本研究の実施にあたり、大阪大学の服部晋一氏、朝倉響君、リック株式会社の岩野聡史氏にご助力いただいた。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, 2016年2月
- 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, pp.1, 2015年2月
- 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, 2013.8
- 4) 朝倉響, 鎌田敏郎, 服部晋一, 内田慎哉, 寺澤広基:伝搬距離の異なる複数の音響伝達関数を用いた PC グラウト充填状況の非破壊評価手法, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, V-431, 2015