

論文 火害を受けたコンクリートの衝撃弾性波法による劣化深さの評価方法の検討

岩野 聡史*1・内田 慎哉*2・春畑 仁一*3・渡部 正*4

要旨：本研究では、ガス加熱炉により温度 500℃で 1 時間と 4.5 時間の加熱を行ったコンクリート試験体で、衝撃弾性波法に基づく多点表面伝搬時間差法を適用し、火害を受けたコンクリートの劣化深さの評価を試みた。既往の研究での解析方法を検討した結果、この方法の仮定は今回の試験体の状況とは一致せず、適用できないことが確認された。そこで新しい解析方法を提案して検討した。その結果、新しい解析方法により、多点表面伝搬時間差法の測定結果から火害による劣化深さ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、火害、非破壊試験、衝撃弾性波法、多点表面伝搬時間差法、ミラー層

1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに火害がある¹⁾。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^{2), 3)}。筆者らも、非破壊試験の一手法である衝撃弾性波法に着目し、火害を受けたコンクリートの加熱面の片側表面からの測定により、劣化部の面的な範囲、さらにはその深さを評価する試験方法について検討している^{3), 4), 5)}。

劣化深さを評価するための測定方法については、加熱面であるコンクリート表面に弾性波の入力点と受信点を複数点設け、各入力点と受信点において、最初に到達する弾性波の伝搬時間を測定する方法（以下、多点表面伝搬時間差法という）を検討している。火害を受けたコンクリートでは、表面側の弾性波速度は内部よりも低下し、表面からの深さが大きくなるに従って劣化は軽減し、弾性波速度は徐々に大きくなると想定される。そこで、測定された伝搬時間差から森濱らにより提案⁶⁾されている解析方法を用いて（以下、従来法という）、コンクリート表面からの深さと弾性波速度の関係式（以下、深さ方向の速度分布という）を推定し、劣化深さを評価する方法を検討してきた。しかしながら、既往の研究では⁵⁾、加熱温度（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をいう）を 500℃、700℃とした場合には、従来法では深さ方向の速度分布が算出できない場合があるという課題が確認された。

そこで本研究では、コンクリート試験体 2 体に対して、ガス加熱炉により加熱温度 500℃での加熱を 1 時間と 4.5 時間で行い、加熱後の試験体において多点表面伝搬時間差法により測定し、既往の研究では評価困難な場合においても火害による劣化深さを評価する新しい解析方法に

ついての検討を行った。

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)）を口の字状に 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/cm³）、水：地下水、細骨材：大

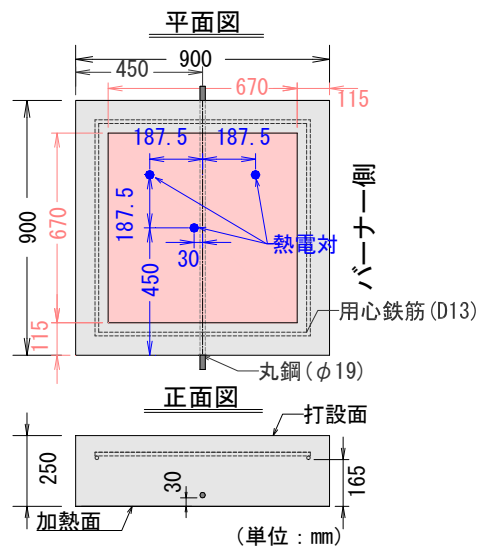


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	A
57.0	46.1	168	295	594	257	1002	2.95

*1 リック (株) 技術研究所課長 博士(工学) (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 (一財) 日本建築総合試験所 試験・研究センター (正会員)

*4 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

分県津久見市産砕砂（表乾密度：2.68g/cm³，粗粒率：2.85）および京都府亀岡市産砕砂（表乾密度：2.60g/cm³，粗粒率：2.85），粗骨材：京都府亀岡市産砕石（表乾密度：2.68g/cm³，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、スランブ9.0cm，空気量4.1%である。強度試験用の円柱供試体は，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結果，圧縮強度は32.4N/mm²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（46090kJ/m³）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℃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℃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℃，4.5h試験体で63℃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。

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，多点表面伝搬時間差法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

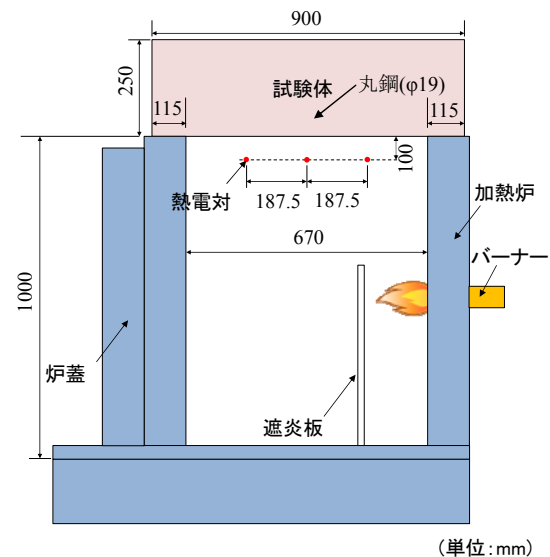
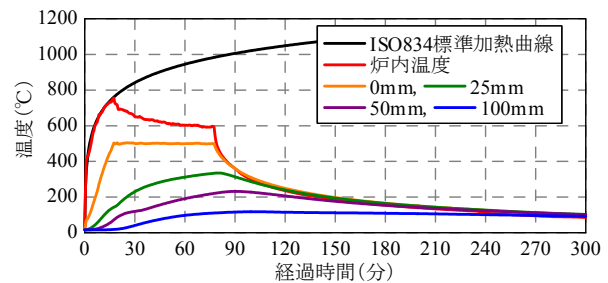
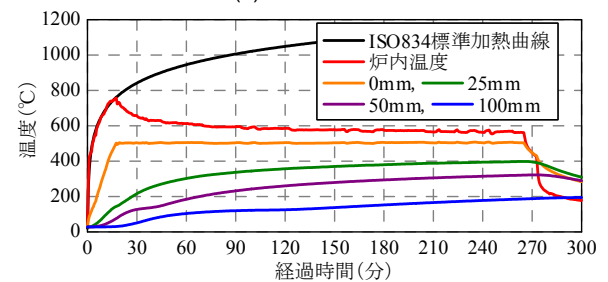


図-2 ガス加熱炉の概要



(a) 1.0h 試験体



(b) 4.5h 試験体

図-3 試験体の温度履歴

表-2 コアの圧縮強度・静弾性係数

試験体名称	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (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。

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。なお，採取したコアは非加熱面側を切断し，長さが約200mmとなるように加工して，試験を実施している。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。

4. 多点表面伝搬時間差法の測定結果および考察

多点表面伝搬時間差法の測定状況を図-4、写真-1に示す。加熱面のコンクリート表面に弾性波の入力点と受信点を設定した。入力点を周波数範囲(±1dB)が0.4~10000Hzの加速度計を内蔵した球冠半径7.5mmのハンマで打撃することで弾性波を入力し、受信点に最初に到達した弾性波の伝搬時刻と弾性波の入力時刻から伝搬時間差を測定した。入力点と受信点の距離は、200mmから50mm間隔で走査し、850mmまで設定した。測線は、加熱範囲内で5測線となるように設定した(図-4参照)。この測定を1.0h試験体と4.5h試験体で加熱後にそれぞれ行った。比較のため、加熱前の1.0h試験体でも同様に行った。受信点に設置した圧電型加速度計の仕様は、感度10mV/(m/s²)、周波数範囲(±3dB)0.2Hz~20000Hzである。なお、サンプリング時間間隔は0.5μsに設定した。

図-5に各試験体での多点表面伝搬時間差法の測定結果を示す。加熱前の試験体では、入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係は、切片が0となる一つの直線で近似できる。この結果から、入力点と受信点の各距離で受信点に最初に到達した弾性波は、伝搬距離

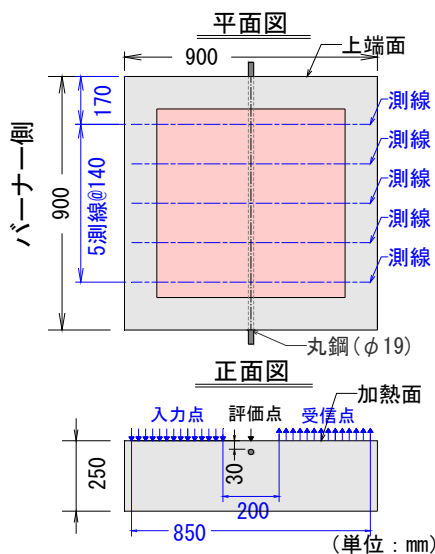
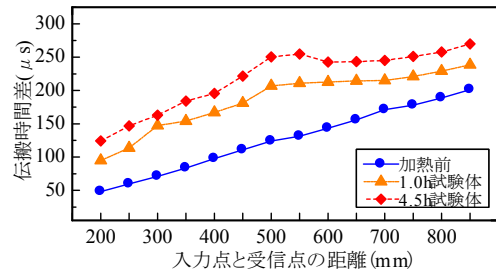


図-4 多点表面伝搬時間差法の測定概要

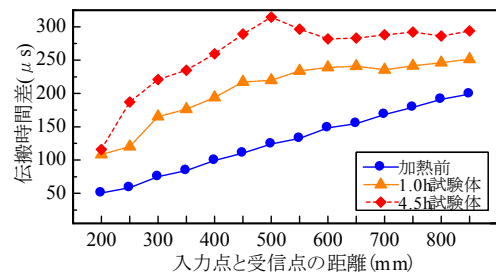


写真-1 多点表面伝搬時間差法の測定状況

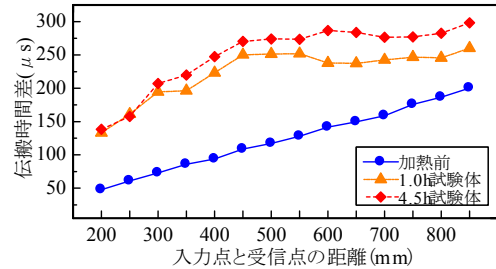
が入力点と受信点の距離となるコンクリート表面を伝搬した縦弾性波であると判断できる。一方、加熱後の試験体では、加熱前と比較して測定される伝搬時間差は大きくなった。また、入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係は一つの直線で示される関係ではなく、入力点と受信点の距離により、測定される伝搬時間差の変化量が異なる関係となった。具体的には、例えば図-



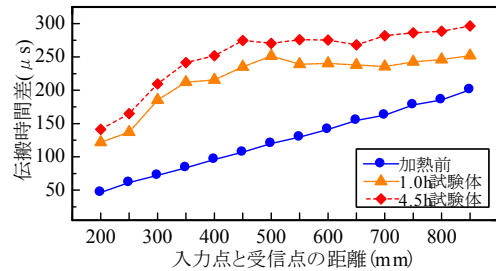
(a)上端面から170mm



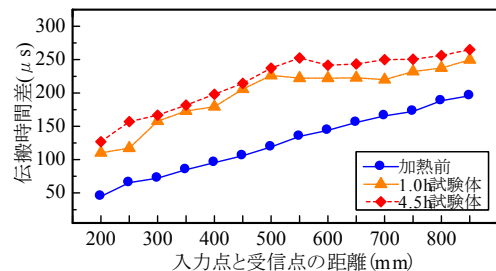
(b)上端面から310mm



(c)上端面から450mm



(d)上端面から590mm



(e)上端面から730mm

図-5 各測線での伝搬時間差の測定結果

5(a)の場合では、距離が 500mm 以下では、距離の変化に対する伝搬時間差の変化量が大きく、距離が 500mm 以上では、距離の変化に対する伝搬時間差の変化量は小さくなっている。加熱面側のコンクリート表層部分の弾性係数と弾性波速度が、加熱の影響で内部のコンクリートのそれらよりも低下したことにより、受信点に最初に到達した弾性波が、速度の大きいコンクリート内部を経由した縦弾性波になったと推察される。以上のとおり、加熱前後により入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係には変化が生じることが確認された。さらに、加熱継続時間が長くなるほど、これらの変化傾向は強くなっていることも明らかとなった。

5. 劣化深さの評価方法

5.1 従来法の測定原理と課題

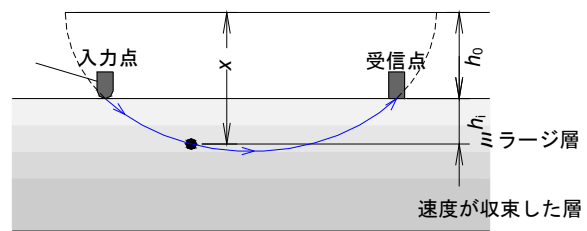
多点表面伝搬時間差法による測定結果から劣化深さを評価する方法として、従来法では、深さ方向の速度分布を、森濱らにより提案⁶⁾されている式(1)を適用して推定し、健全部の速度となる深さから劣化深さを評価する方法が提案されている^{3), 4), 5)}。

$$V(x) = Kx^{0.1} = K(h_0 + h_i)^{0.1} \quad (1)$$

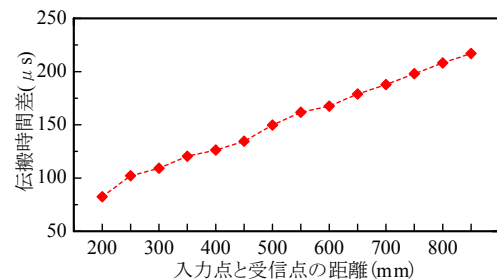
ここで、 K 、 h_0 ：定数、 h_i ：コンクリート表面からの深さ、 $V(x)$ ：深さ x での弾性波速度、ただし、 x は h_0 と h_i との和である。

従来法での模式図を図-6(a)に示す。従来法では、まず、火害が生じたコンクリートの表層側はコンクリートの弾性波速度が内部よりも低下することを前提としている。また、表面からの深さが大きくなるに従って劣化の程度が軽減して、弾性波速度が連続して徐々に大きくなり（ミラー層⁷⁾）、ある深さ以上で速度が一定値に収束すると仮定している。この仮定と式(1)に基づき推測した伝搬時間差と、実際に多点表面伝搬時間差法で測定された伝搬時間差とを比較することで、式(1)の K 、 h_0 を決定し、その結果から劣化深さの推定が可能となる。

ここで、従来法により劣化深さが評価された場合での多点表面伝搬時間差法の測定結果を図-6(b)に示す⁴⁾。図-6(b)は、既往の研究⁴⁾において、部材厚さ 400mm のコンクリートで、加熱条件をガス炉にて炉内温度を 600℃まで昇温し、600℃を 280 分保持した場合での測定結果である。劣化深さは約 250mm と評価された。図-6(b)の入力点と受信点の距離と測定された伝搬時間差との関係に着目すると、一つの直線で示される関係である。この場合には、従来法により劣化深さの評価が可能となる。ただし、今回の加熱後の試験体での多点表面伝搬時間差法による測定結果は、3 章に示したとおり、入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係は一つ

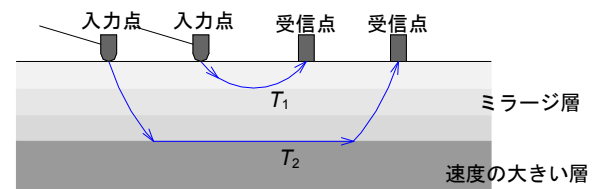


(a)伝搬経路の模式図

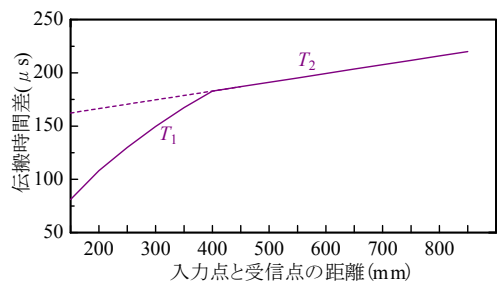


(b)測定される伝搬時間差の例

(参考文献 4)、長さ方向 470mm での加熱後の結果)
図-6 従来法の伝搬経路の模式図と測定結果の例



(a)伝搬経路の模式図



(b)測定される伝搬時間差の例

図-7 提案法の伝搬経路の模式図と測定結果の例
(参考文献 7)をもとに作成)

の直線で示される関係ではない。この場合には、既往の研究⁵⁾にも示したとおり、従来法では深さ方向の速度分布が算出できない。新しい解析方法を考案することが課題であった。

5.2 本研究で提案する新しい解析方法

前節に示した課題に対して、図-7(a)の模式図に示す伝搬経路となるモデル⁷⁾を検討した（以下、提案法という）。提案法はミラー層の下に、弾性波速度がミラー層とは不連続で、ミラー層の最下部よりも大きく、さらに、一定の速度を持つ層があると仮定している。この条件の場合に測定されるであろう伝搬時間差の模式図を図-7(b)に示す。まず、入力点と受信点の距離が短い場合には、ミラー層を伝搬した弾性波の伝搬時間差 T_1

が測定される。ここでの弾性波の伝搬経路は楕円上になり、ミラー層内での深さ方向の速度分布の関係式は式(2)、伝搬時間差 T_1 は式(3)と設定される⁷⁾。

$$V(Z_0) = V_0 + a_0 Z_0 \quad (2)$$

$$T_1 = \frac{2}{a_0} \sinh^{-1} \left\{ \frac{a_0 L}{2V_0} \right\} \quad (3)$$

ここで、 Z_0 はコンクリート表面からの深さ、 V_0 はコンクリート表層での弾性波速度（以下、表層速度という）、 a_0 は定数、 L は入力点と受信点の距離である。

次に、入力点と受信点の距離がある距離以上では、速度の大きい層の表面を経由した弾性波の伝搬時間差 T_2 が測定される。入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係式の切片 t_2 には、式(4)が成立する。

$$t_2 = \frac{2}{a_0} \left\{ \cosh^{-1} \left(\frac{V_2}{V_0} \right) - \cosh^{-1} \left(\frac{V_2}{V_m} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{V_0}{V_2} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{V_m}{V_2} \right)^2} \right\} \quad (4)$$

ここで、 V_m はミラー層最下部での速度、 V_2 はミラー層の下層にある速度が速い層の速度（以下、内部速度という）である。

以上の性質より、提案法のモデルは入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係は、一つの直線で示される関係ではなく、入力点と受信点の距離によって測定される伝搬時間差の変化量が異なる関係となる。これは3章で示した測定結果と一致する。また、次の手順により、ミラー層と速度の大きい層との境界（以下、

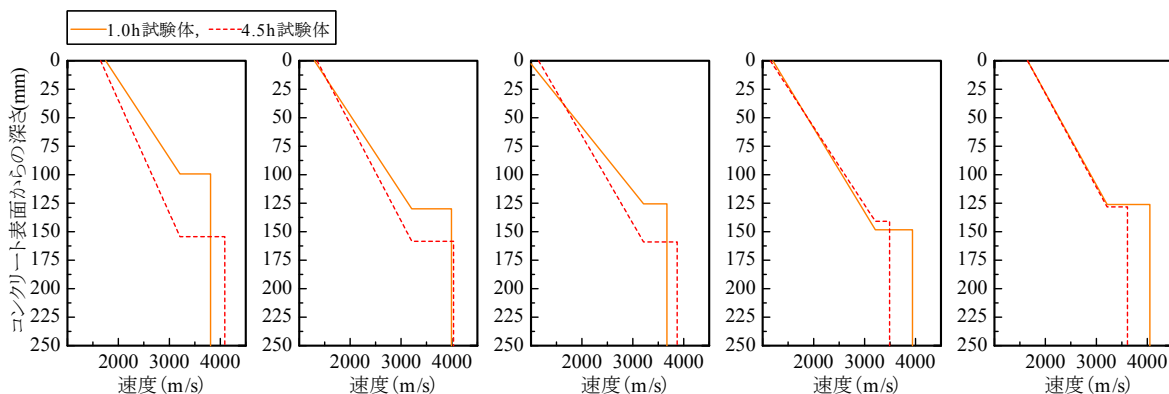
速度変化面という）までの深さを求めることができる。

- 1) 多点表面伝搬時間差法の各入力点と受信点の距離で測定された伝搬時間差を比較して、測定される伝搬時間差が T_1 から T_2 に変化する入力点と受信点の距離 L_0 を判断する。
- 2) 式(3)の V_0 と a_0 を任意に設定し、距離 L_0 以下での T_1 を算出する。この結果と多点表面伝搬時間差法の距離 L_0 以下で実際に測定された伝搬時間差 T_1 とを比較し、誤差が最小となる条件から、 V_0 と a_0 を決定する。
- 3) 多点表面伝搬時間差法の距離 L_0 以上で実際に測定された伝搬時間差 T_2 と、入力受信点間距離との関係式を最小二乗法で求め、関係式の切片を求める。
- 4) 式(4)の V_m と V_2 を任意に設定し、2)で決定した V_0 と a_0 から t_2 を算出する。この結果と3)により求めた関係式の切片とを比較し、誤差が最小になる条件から、 V_m と V_2 を決定する。
- 5) 2)で決定した V_0 と a_0 を式(2)に代入し、 $V(Z_0)$ が4)で決定した V_m となる深さ Z_0 を速度変化面までの深さとする。

図-5に示した多点表面伝搬時間差法の測定結果から、上記の手順により、表層速度、速度変化面までの深さ、ミラー層最下部での速度、内部速度を求めた。この結果を表-3、図-8に示す。表-3、図-8より、速度変化面までの深さは1.0h試験体で99mm~148mm、4.5h試験体で128mm~159mmとなり、加熱継続時間が長くな

表-3 深さ方向の速度の測定結果

試験体	測定項目	測定位置：上端面からの距離(mm)				
		170	310	450	590	730
1.0h 試験体	表面速度(m/s)	1750	1300	950	1200	1650
	速度変化面までの深さ(mm)	99	130	126	148	126
	ミラー層最下部での速度(m/s)	3400	3600	3260	3410	3290
	内部速度(m/s)	3810	3990	3670	3940	4050
4.5h 試験体	表面速度(m/s)	1650	1350	1150	1150	1650
	速度変化面までの深さ(mm)	154	158	159	141	128
	ミラー層最下部での速度(m/s)	3210	2380	3010	2700	3010
	内部速度(m/s)	4090	4030	3870	3490	3610



(a)上端面から170mm (b)上端面から310mm (c)上端面から450mm (d)上端面から590mm (e)上端面から730mm

図-8 深さ方向の速度分布の測定結果

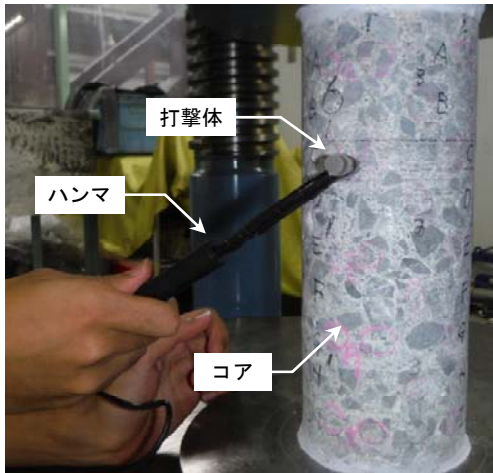


写真-2 採取したコアでの接触時間の測定状況

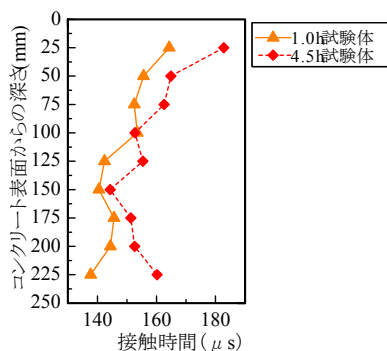


図-9 採取したコアで測定した各深さの接触時間

るほど測定される速度変化面までの深さは大きくなった。

この結果を検証するため、加熱後の各試験体から採取したコア（直径 100mm）で接触時間試験⁸⁾を実施した。この状況を写真-2 に示す。採取したコアの側面を周波数範囲（±1dB）が 0.4～10000Hz の加速度計を内蔵した球冠半径 7.5mm のハンマで打撃し、コンクリートとの接触時間を測定した。ここで測定される接触時間は、打撃体との接触するコンクリートの弾性係数やブルネル硬さが大きくなると短くなる性質がある。測定位置はコンクリート表面からの深さ 25mm から 25mm 間隔で深さ 225mm までとし、各深さでの打撃点は円周方向に 25mm 間隔の 13 点とした。採取した 3 本のコアの各深さで接触時間を測定し、平均値を求めた。この結果を図-9 に示す。図-9 より、コンクリート表層付近では接触時間が長くなるが、1.0h 試験体では深さ 125mm 以深、4.5h 試験体では 150mm 以深で接触時間が短くなった。これらの深さではコンクリートの弾性係数、ブルネル硬さが大きくなっていると判断できる。これは表-3、図-8 に示した速度変化面までの深さと概ね同様の結果である。以上の結果より、多点表面伝搬時間差法の測定結果から求める速度変化面までの深さを推定することで、火害により劣化した深さを評価できる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 本研究で対象とした試験体では、多点表面伝搬時間差法により測定した結果、入力点と受信点の距離と測定される伝搬時間差との関係は一つの直線で示される関係とはならず、入力点と受信点の距離により伝搬時間差の変化量が異なった。
- (2) 上記(1)に示す結果が得られた場合は、従来法を適用して火害による劣化深さの評価は困難であることを確認した。
- (3) 本研究では、入力点と受信点の距離によって測定される伝搬時間差の変化量が異なる場合においても適用可能なモデルを仮定し、これに基づく新しい解析方法を提案した。その結果、求めた速度変化面までの深さから火害による劣化深さを評価できる可能性があることを明らかにした。

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) 岩野聡史，内田慎哉，麓隆行，小澤満津雄：衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートの劣化評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第 28 巻，pp.35-45，2017.3
- 5) 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，Vol39，No.1，pp.1915-1920，2017.6
- 6) 例えば，(独) 土木研究所・(社) 日本非破壊検査協会：超音波試験（土研法）による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），pp.10-11，2006.5
- 7) 田治米鏡二：土木技術者のための弾性波による地盤調査法，槇書店，pp.55-59，1977.3
- 8) NDIS 3434-2²⁰¹⁷：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，一般社団法人日本非破壊検査協会，2017