

報告 超音波表面走査法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

藤原 規雄*1・西谷 慶彦*2・春畑 仁一*3・内田 慎哉*4

要旨：本研究では、火害を受けたコンクリートの面的な劣化の広がりとその深さを把握することを目的として、加熱冷却後のコンクリート試験体を対象に各種の非破壊試験を実施した。本稿で報告する超音波表面走査法は、表面からの測定で劣化の深さを推定することを目的とした非破壊試験である。今回の実験結果からは、同法で火害による劣化深さを精度よく推定することは難しいと考えられるが、幾つかの指標を組み合わせることなどで劣化の程度を定性的に評価することはできると考えられる。

キーワード：コンクリート, 劣化, 火害, 非破壊試験, 超音波表面走査法, 伝搬時間

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。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、劣化は火災によってもたらされるという災害的要素が大きいため、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、加熱面において超音波表面走査法による測定を行って、表面から火害の劣化状況の評価する手法としての適用性について検討することとした。本稿では、その測定結果と火害の劣化深さの評価に適用できる可能性について報告する。

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、5体作製した。供試体中にはかぶりを165mmとして異形棒鋼(D13)と、図-1に示すようにコンクリート表面から0, 25, 50, 100mmの位置にK熱電対を設置し、呼び強度24のレディーミクストコンクリートを打設した。コンクリートの使用材料、配合は表-1および表-2に示すとおりである。なお、試験体は、コンクリート打設後7日目に脱型し、その後、

加熱試験を実施するまで屋内に静置した。試験体に使用した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%、封緘養生したテストピースの材齢28日における圧縮強度は31.4N/mm²であった。

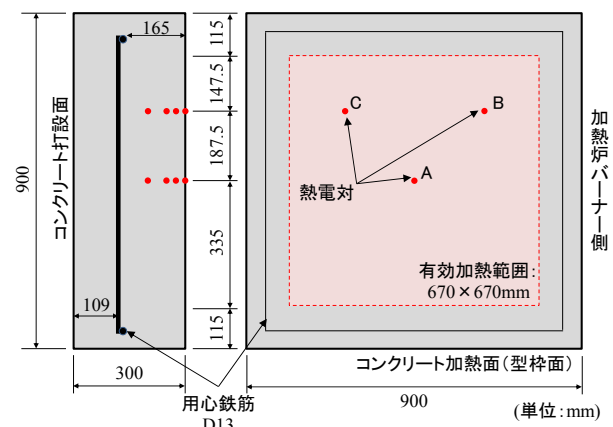


図-1 試験体の形状および熱電対の設置位置

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水および上澄水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度:3.14g/cm ³)
細骨材	S1	佐賀県小川島産海砂 (表乾密度:2.56g/cm ³ , 粗粒率:2.80)
	S2	京都府亀岡市産砕砂 (表乾密度:2.64g/cm ³ , 粗粒率:2.85)
粗骨材	G	京都府亀岡市産砕石 (表乾密度:2.67g/cm ³ , 実積率:58.0%)
混和剤	Ad	AE 減水剤(変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)

*1 (株) 国際建設技術研究所 技術部 副部長 (正会員)

*2 (株) 国際建設技術研究所 技術部

*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 (正会員)

表-2 コンクリートの計画配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 (%)	空気量 (%)	粗骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	S1	S2	G	Ad
20	8.0	57.0	4.5	44.7	168	295	560	240	1023	2950

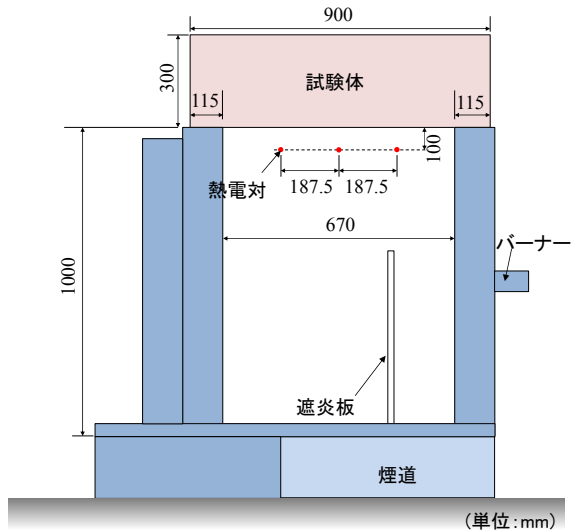


図-2 ガス加熱炉の概要

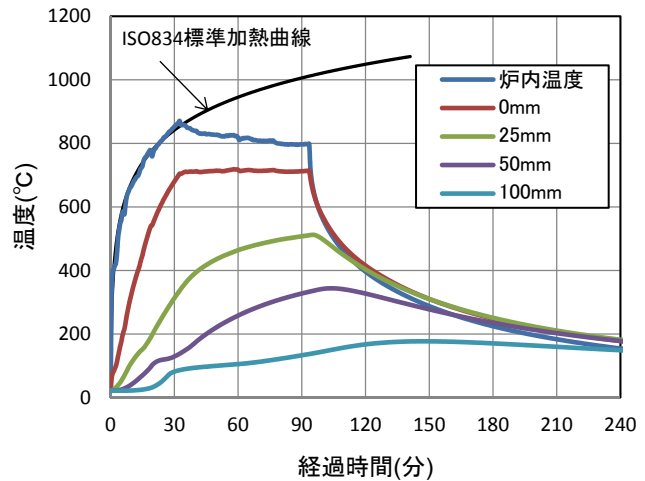


図-3 加熱実験時の温度履歴
(加熱面 700℃, 60 分加熱)

2.2 加熱方法

作製した5体の試験体のうち4体については、火害による劣化を再現するため事前に加熱実験を行った加熱実験は、図-2 に示すように試験体をガス加熱炉上に設置し、試験体の打設時における底面を所定の温度と時間で加熱した。試験体の加熱温度は、加熱面の表面温度（熱電対 A～C の表面温度の平均値）で、110, 300, 500, 700℃ の4水準とし、加熱時間はそれぞれ60分とした。なお、試験体加熱面の有効加熱寸法は、長さ670mm×幅670mmである。

加熱方法は、まず ISO834 に規定される標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させ、その後、所定の温度が維持できるように、ガス加熱炉内の3箇所に配置したK熱電対で炉内温度をモニタリングして燃焼温度を調整した。所定温度で60分加熱したあとは、加熱を終了し、加熱炉側面の炉蓋を開放して自然冷却した。図-3 に、加熱温度700℃とした試験体の深さ（加熱面からの距離）0, 25, 50, 100mmにおける温度履歴を示す。なお、同図に示した各深さの温度は、熱電対 A～C で計測した値の平均値である。同図より、コンクリート表面の温度（図中の0mm：赤線）が設定した加熱温度（700℃）を所定の時間維持できていることがわかる。

3. 加熱した試験体のコンクリートの諸物性

3.1 コンクリートコアの採取箇所

加熱後の各試験体から圧縮強度や静弾性係数、中性化深さを測定するためのコンクリートコアを採取した。コアの採取は、各種非破壊試験の測定終了後（加熱実験日の翌々日）に実施し、ダイヤモンドコアドリルを用いて、試験体加熱面のバーナー側付近、バーナーから離れた箇所（非バーナー側）、および加熱面中央（図-4 参照）から1本ずつの計3本を採取した。いずれのコアも直径はφ83mmで、強度試験用に整形しても直径の2倍を確保できる長さで採取した。なお、未加熱の試験体についても、同様の方法および位置で計3本のコアを採取した。

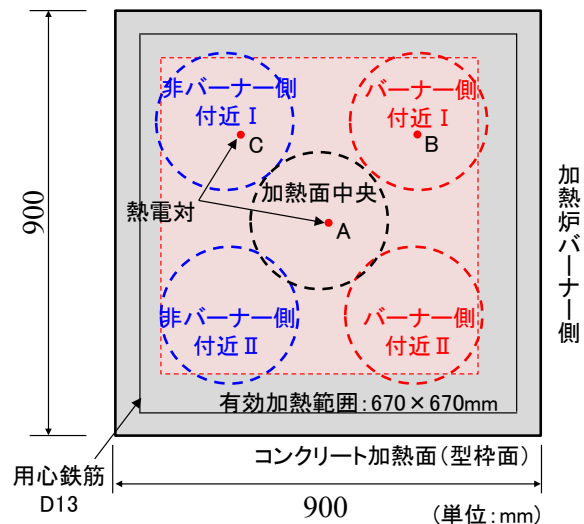


図-4 コンクリートコアの採取位置

3.2 コンクリートコアによる各種試験

各試験体から採取したコアは、いずれも採取した翌日に圧縮強度および静弾性係数の試験を、翌々日に中性化深さの測定を行った。なお、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」に準拠して実施した。また、中性化深さの測定は、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して実施した。各コアの試験結果を表-3に示す。

同表に示すように、圧縮強度や静弾性係数といった力学的な物性値は加熱温度が高くなるにしたがって低下したが、中性化深さについては、加熱温度 500℃の試験体の方が 700℃の試験体よりも大きな値となった。既往の研究成果³⁾でも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とされており、今後、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この原因の検討を行う予定である。

表-3 コンクリートコアの各試験結果*1,*2

加熱温度 (℃)	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*3	20.3*4	4.5

*1：コアは整形後で、D=φ87mm、L=2D(整形後)

*2：各試験結果は採取したコア3本の平均値。

*3,*4：表層付近の劣化が著しいため、圧縮強度・静弾性係数試験は80mm以深から切り出したコアで実施。

4. 超音波表面走査法による劣化深さの推定

4.1 超音波表面走査法の概要

超音波表面走査法は、表面からの測定で断面内の劣化深さを評価することを目的とした非破壊試験である。

部材の表面に二つの探触子（発信子と受信子）を配置して超音波を伝搬させると、受信側には断面の表層付

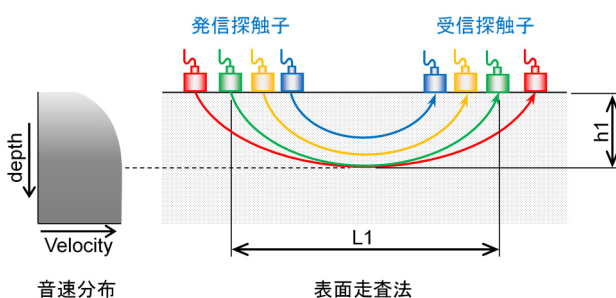


図-5 表面走査法の超音波伝搬経路のイメージ

近を伝搬してきた波が最初に到達するが、探触子の間隔を広げていくと超音波の伝搬経路は次第に部材の深部に移行していく。このため、表層付近のコンクリート品質が低い部材においては、探触子間距離が短いうちは見掛けの伝搬速度が遅く、長くなるにしたがって速度が向上する傾向を示す。一方、探触子の間隔がある程度まで広がって品質的に変化のない部分を超音波伝搬するようになると、それ以降は見掛けの伝搬速度に大きな変化は見られないようになる（図-5 参照）。

（独）土木研究所では、部材表面で測定した超音波の伝搬速度からコンクリートの圧縮強度を推定する非破壊試験⁴⁾（以下、「土研法」という）を提案しているが、同試験では表層付近の低品質な部分（コンクリート表面は打設時や環境の影響で断面内部よりも低い品質となる傾向にある）の影響を排除するために、前述の性質を利用した表面走査法で低品質な部分の深さを推定している。

今回の実験では、これを参考に、表面走査法による測定結果から加熱により劣化した部分の深さを評価できるかどうかを検討した。

4.2 測定方法

今回実験では、図-6に示す超音波の測定システムを使用し、発信側探触子と受信側探触子の間隔を変化させながら超音波の伝搬時間を測定して、それより各探触子間距離における見掛けの伝搬速度（以下、音速という）を算出した。なお、探触子の配置は、発信側探触子と受信側探触子とともに変化させるパターン（図-7 参照）と、発信側の探触子を未加熱部に固定して受信側探触子だけを加熱部に移動させるパターン（図-8 参照）の2種類で測定し、両者の音速に差が出るかどうかについても検討した。

また、各試験体について、深さ方向の実際の音速分布を把握するために、試験体の両側面に発信側および受信側の探触子を対面で配置して超音波を透過させる透過法による測定も実施した。透過法による音速の測定位置は、加熱側の表面から、深さ25mm、50mm、75mm、100mm、150mm、200mm、250mmとした（加熱温度110℃以外の試験体は、加熱前については深さ250mmを測定せず）。

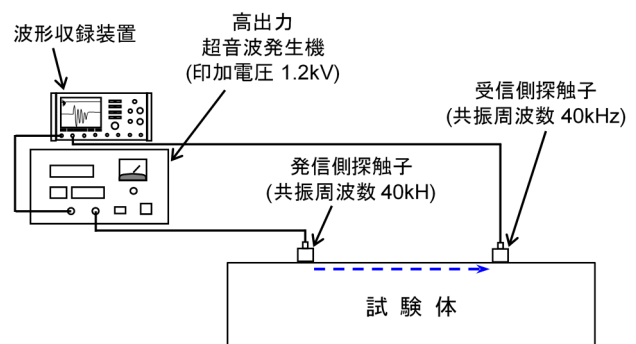


図-6 測定システムの概要

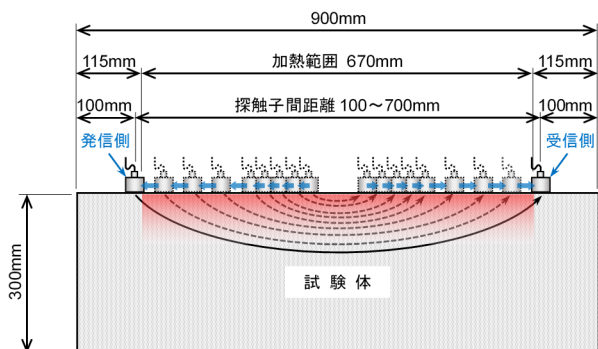


図-7 表面走査法(加熱部で発・受信)の探触子配置
(発信側探触子・受信側探触子とも移動)

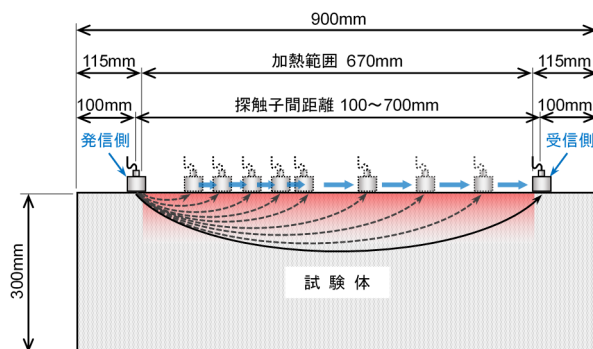


図-8 表面走査法(未加熱部で発信)の探触子配置
(発信側探触子を未加熱部で固定)

4.3 測定結果

表面走査法による測定は、各試験体とも図-9 に示す測線-4 で実施した。なお、透過法で測定した加熱前後の深さ方向の音速分布は図-10～図-11 に示すとおりで、加熱前はどの深さでも 4300m/sec 程度であったが、加熱後は表面に近いほど音速が低下しており、その傾向は加熱温度が高い試験体ほど顕著であった。表面走査法で測定した各試験体の加熱前後の見掛けの音速と探触子間距離の関係(以下、「走次曲線」という)は、図-12～図-15 に示すとおりである。加熱前の音速は、いずれの試験体も探触子間距離 400mm 以上になると 4000m/sec 程度でほぼ一定となったが、加熱後はいずれも音速が低下しており、その傾向は加熱温度が高いものほど顕著で、また同一の試験体では探触子間距離が短いほど大きな度合いであった。測定パターンでは、加熱部で発・受信したパターンの方が、発信側を未加熱部で固定したパターンよりも低下の度合いが大きかった。

表面走査法による劣化深さの推定では、音速が一定となる探触子間距離を把握する必要があるが、加熱後の音速は、110℃に加熱した試験体(以下、「110℃試験体」という。他の試験体も同様の呼称とする)を除いて、探触子間距離を最大の 700mm まで広げても音速が収束しな

かった。110℃試験体については、探触子間距離が 300～400mm 以上になると加熱前と同等の音速に収束した。

なお、表面法では、探触子間距離が小さいほど見掛けの音速が速くなる傾向があるが、これは探触子が同一面にあるため超音波の発・受振が探触子中央よりもやや内側で行われ、実際の伝搬距離が探触子の中心間距離よりもわずかに短くなるからである。探触子間距離が短いほどこの影響で見掛けの音速が速くなるが、加熱前で短い距離にもかかわらず平均より低い音速の箇所もあり、これらは測定面の不陸が影響を受けている可能性もある。

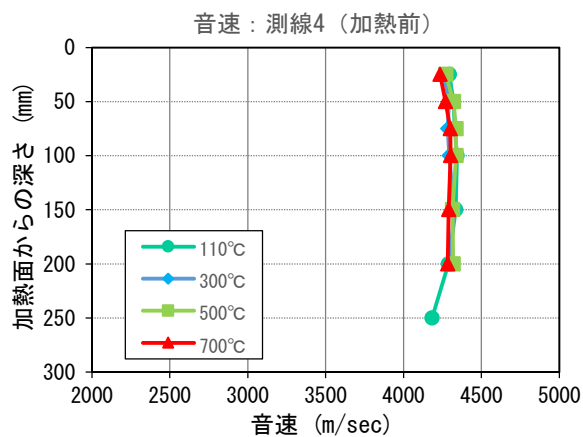


図-10 透過法で測定した各層の音速(加熱前)

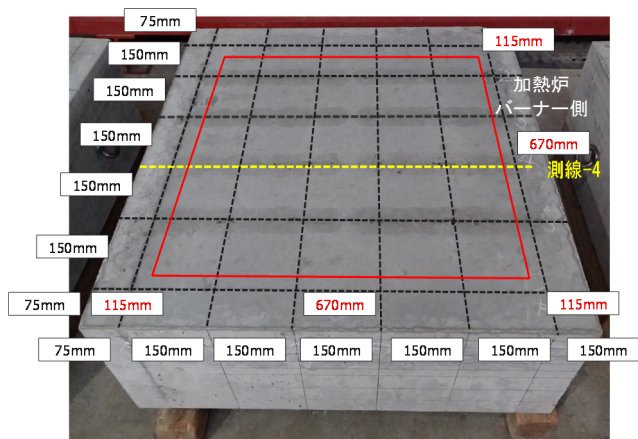


図-9 測線-4 の位置 (各試験体共通)

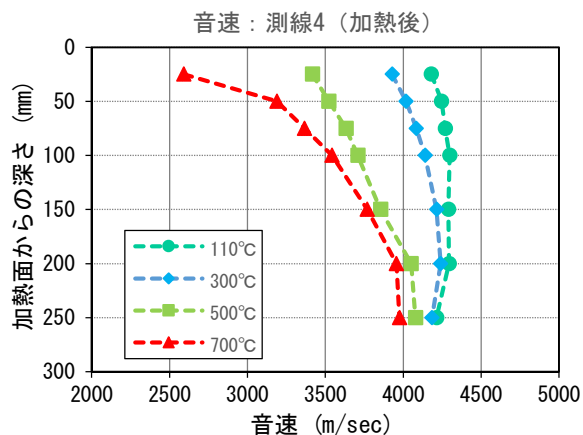


図-11 透過法で測定した各層の音速(加熱後)

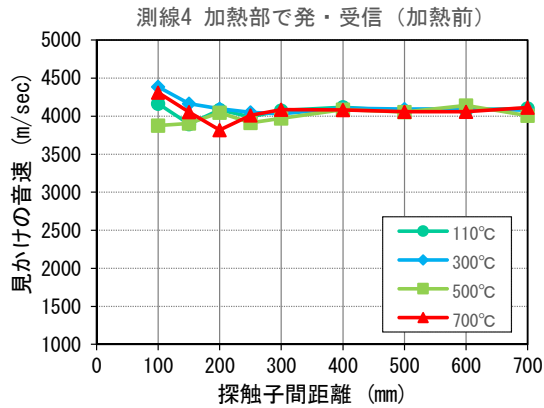


図-12 表面走査法の音速(加熱部で発・受信:加熱前)

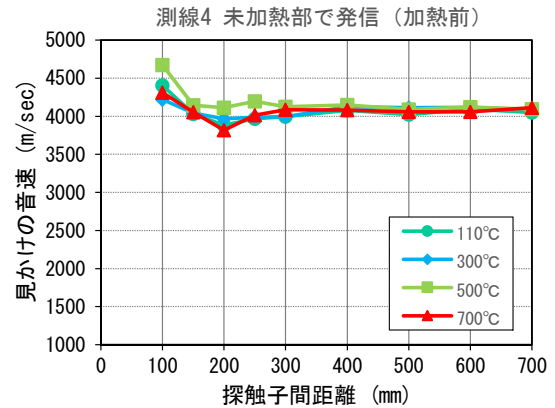


図-14 表面走査法の音速(未加熱部で発信:加熱前)

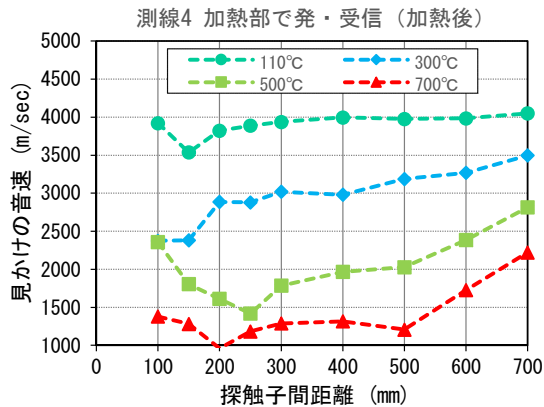


図-13 表面走査法の音速(加熱部で発・受信:加熱後)

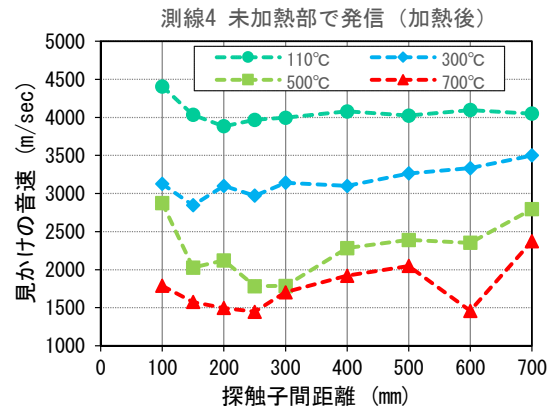


図-15 表面走査法の音速(未加熱部で発信:加熱後)

4.3 結果の考察

110℃試験体以外の試験体の走次曲線は、探触子間距離を広げるに従って見掛けの音速が向上する傾向は見られたものの一定値には収束しなかった。また、走次曲線の曲率や傾きは一定ではなく、土研法で劣化深さを推定することは困難である。なお、110℃試験体以外は、透過法で測定した音速も最深部(深さ250mm)まで低下していたことから、断面全体が劣化や変質が進行していたと考えられ、表面走査法による音速が探触子間距離を最大まで広げても収束しなかったことは、それを体現しているとも考えられる。なお、110℃試験体については、探触子間距離が300～400mm以上になると加熱前と同等の音速に収束していることから、土研法により劣化深さを推定

することが可能である。

加熱前の音速はどの試験体も大差なく、表面走査法では4000m/sec程度、透過法では4300m/sec程度であった。表面走査法での超音波の伝搬経路が円弧状であるとして、この音速差をもとにニュートン・ラフソン法で各探触子間距離における伝搬経路の深さ(図-16の左図を参照)を算出すると、表-4に示すとおりになる。これに表されるように、健全なコンクリートの場合、探触子間距離を700mmまで広げても超音波の伝搬する経路は最深部でも表面から95mm程度である。

一方、加熱された試験体は、表面走査法および透過法による音速がともに低下しているが、加熱温度が高い試験体ほど両者の差がより大きくなる傾向が見られた。両

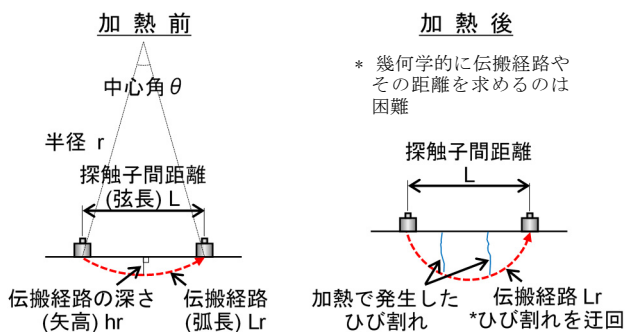


図-16 表面走査法の超音波の伝播経路

表-4 探触子間距離と実際の伝搬経路の距離(加熱前)

探触子間距離(弦長) L (mm)	見かけの音速 V (m/sec)	実際の音速 Vr (m/sec)	実際の伝搬距離(弧長) Lr (mm)	伝搬経路の深さ(矢高) hr (mm)	半径 r (mm)	中心角 θ
300	4100	4300	314.6	40.8	296	60.897
400	4100	4300	419.5	54.5	394.4	60.947
500	4100	4300	524.4	68.1	492.7	60.977
600	4100	4300	629.3	81.8	591.1	60.997
700	4100	4300	734.1	95.3	690.4	60.925

者の差が大きいほど表面走査法の超音波伝播経路が長くなっていると考えられる。例えば、500℃試験体の最も遅い音速は表面付近（深さ 25mm）の 3400m/sec 程度であるが、表面走査法で測定した見掛けの音速は、探触子間距離 400～500mm で 2000m/sec 程度、700mm においても 2800m/sec 程度で大きな差がある。仮に、同試験体断面の平均的な音速が 3400m/sec あるとして伝搬経路の距離を換算すると、探触子間距離 700mm の場合で探触子間距離よりも 21%程度、400～500mm で 60～70%程度長くなり、探触子間距離との差が 5%程度であった加熱前とは大きな差がある。実際には、加熱後の試験体の深部の音速低下は表層よりも緩やかであるので、伝搬経路の距離はさらに長いと考えられる。

加熱後に伝搬経路が長くなる原因としては、加熱で生じたひび割れの影響と考えられる（図-16 の右図を参照）。超音波は、ひび割れがあるとそれを迂回して伝搬するため伝搬経路が長くなるが、伝搬経路はひび割れの深さだけでなく、探触子とひび割れの位置や角度との関係でも変化する。また、自然に発生したひび割れは深さや形状も一定ではなく、超音波は鉛直方向だけでなく斜方向や水平方向に迂回する場合もある。このような状況においては、超音波の伝搬経路を幾何学的に推定するのは難しく、現時点では表面走査法で劣化深さを評価することは困難である。

一方、表面走査法で測定した音速は加熱温度に応じて低下しており、また、収束には至らずバラツキも大きい。どの試験体も走次曲線は探触子間距離が広がるにしたがって速度が漸増する形状となっている。今回の実験では透過法で深さ方向の音速分布も測定していることから、これらを基準として表面走査法により断面方向の音速分布や深さ方向の劣化度合いを定性的に評価できる可能性がある。

なお、加熱温度が高くなると、未加熱部で発信するパターンの方がやや速度が速くなる傾向があり、測定時には探触子の設置箇所についても注意する必要がある。

また、表面走査法では、通常、探触子間距離が広がるにつれて受信側に到達する超音波のエネルギーが減衰して受信波の振幅は小さくなるが、高温に加熱された試験体では、ある距離から振幅が大きくなる傾向が見られた。110℃試験体は、加熱後も探触子間距離が広がるにつれて受振波形の振幅が小さくなったが、300℃以上に加熱された試験体については、探触子間距離 500mm までは小さくなっていった振幅が 600mm から反対に大きくなった。このような傾向も定量的に評価できれば、劣化部の深さの評価指標にできる可能性がある。

今後は、各試験体の測定結果を子細に分析するとともに、他の分析結果などと照査して、劣化深さの評価指標

に適用できる定常的な傾向の有無を検討していく。

5. まとめ

今回の実験結果のまとめを、箇条書きにして示す。

- (1) 加熱前において、透過法で測定した音速は試験体や表面からの深さが異なっても 4300m/sec 程度でほとんど差がなかった。一方、表面走査法による見掛けの音速は、短い探触子間距離ではバラツキがあったが、各試験体とも 4000m/sec 程度で収束した。
- (2) 加熱後は、いずれの試験体も音速が低下したが、加熱温度の高い試験体ほど低下の度合いは大きかった。表面走査法で劣化深さを推定するには、音速が一定となる探触子間距離を把握する必要があるが、110℃試験体以外は探触子間距離を最大の 700mm まで広げても音速が収束しなかった。
- (3) 加熱後の試験体では、ひび割れの影響で超音波の伝搬経路が大きく変化していた。伝搬経路はひび割れの発生状況や探触子との位置関係によって様々に変化するため、幾何学的に伝搬経路やその距離を推定するのは難しく、現時点では表面走査法で劣化深さを評価することは困難である。
- (4) 一方、表面走査法で測定した音速は加熱温度に応じて低下しており、また、走次曲線にも加熱温度に対応した傾向が見られることから、これらを基準として表面走査法により断面方向の音速分布を定性的に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、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 年 8 月
- 4) 国立研究開発法人土木研究所：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），2006 年 6 月（H21 修正）