

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

岩野聡史*1・内田慎哉*2・麓 隆行*3・小澤満津雄*4

概要：本研究では、火害による劣化部の面的な範囲と深さを、コンクリートの片側表面から衝撃弾性波法により評価する方法について検討することを目的とした。その結果、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し、劣化部の面的な範囲を推定できると考えられる。ただし、劣化の程度が軽微であれば、試験方法の測定精度による誤差との判別が困難となり、範囲を狭く推定する可能性がある。また、多点表面伝搬時間差法は、加熱面からの深さ方向の弾性波速度の構造を評価でき、劣化部の深さを推定できる。ただし、加熱範囲外では過少に推定すること、また、X線CT法で劣化部の深さが50mm程度未満と評価される劣化は判断できないことがわかった。

キーワード：火害、非破壊試験、衝撃弾性波法、X線CT法、接触時間、伝搬時間、CT値

1. はじめに

コンクリートの劣化の一つに火災などの熱による火害がある¹⁾。ここで火害とは、建物の内外装材料および構成部材の火災による劣化または喪失と定義されている²⁾。コンクリートでは、加熱を受けるとセメント硬化体と骨材とがそれぞれ異なった膨張収縮挙動を示し、それによってコンクリートの組織が緩み、ひび割れが発生して劣化する。このことから、劣化の程度は加熱された温度によって異なり、位置や加熱面からの深さによって異なることが考えられる。火害を受けたコンクリートに対しては、その後の対策を検討するための調査方法が示されているが、位置や加熱面からの深さによって異なる劣化部の範囲を直接判断できるような試験を実施することが有効になると考えられる。また、火害を受けたコンクリートでは、一日も早い復旧が望まれる場合が多いため、いかに迅速かつ適切に調査を行うことができるかが重要となるとされている。

そこで本研究では、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計測により、劣化部の面的な範囲と深さを評価する試験方法について検討した。衝撃弾性波法では、コンクリート表面を鋼球やハンマなどの打撃体により打撃し、打撃体がコンクリートに接触している時間や

コンクリート中を伝搬した弾性波をそれぞれ測定する。本研究では、前者として接触時間法(2.1 参照)を、後者は多点表面伝搬時間差法(2.2 参照)を適用した。前述の課題に対して、非破壊であることから、火害を受けたコンクリートの任意の箇所でも直接試験ができ、また、衝撃弾性波法は比較的短時間で測定できることから、より広範囲で試験が実施できるという利点がある。しかしながら、これまで衝撃弾性波法による火害を受けたコンクリートに対する試験方法は、十分に検討されていなかった。そこで、加熱した供試体を対象として、衝撃弾性波法による測定を行い、X線CT法、側面透過法およびコア採取による目視観察も併せて実施し、衝撃弾性波法による結果と比較・検証した。

2. 適用した衝撃弾性波法の測定原理

2.1 火害を受けたコンクリートの面的な劣化範囲の評価方法

火害を受けたコンクリートの面的な劣化範囲は、コンクリート表面をハンマで打撃した時の、ハンマとコンクリートとの接触時間を測定する方法(以下、接触時間法という)により評価した³⁾。この方法の測定値である接触時間は、コンクリート表層付近の弾性係数やブリネル硬さの指標値となることから、新設コンクリートにおいて

*1 リック(株)技術研究所課長(正会員) 〒143-0004 東京都大田区昭和島2-4-3

*2 立命館大学講師 理工学部環境システム工学科 博士(工学)(正会員) 〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

*3 近畿大学准教授 理工学部社会環境工学科 博士(工学)(正会員) 〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1

*4 群馬大学大学院准教授 理工学府環境創生部門社会基盤・防災コース 博士(工学)(正会員) 〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1

て養生方法の相違によるこれらの性状の変化を、非破壊で相対的に評価する試験として提案されている^{3),4)}。本研究では、複数の点で接触時間を測定し、得られた値を相対的に比較することにより、劣化部の面的な範囲の推定を試みた。

接触時間法の測定状況を写真-1に示す。コンクリート表面を先端にセンサを内蔵したハンマで打撃し、この時にハンマがコンクリートに接触した時間を測定する。測定で得られる打撃波形の例を図-1に示す。ハンマとコンクリートが接触すると衝撃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。打撃波形は上に凸の放物線のような波形となるが、この打撃波形において、接触を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、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となる。測定される接触時間は、式(1)、式(2)で示されるこれらの時間の和となる⁵⁾。

$$t_m = \frac{\pi}{2\beta} \left(\text{ただし, } \beta = \sqrt{\frac{2\pi R \sigma_p}{m}} \right) \quad (1)$$

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

ここで、 t_m ：ハンマがコンクリート表面に貫入している時間、 R ：ハンマの半径、 σ_p ：弾性限界での応力、 m ：ハンマの質量、 t_R ：ハンマがコンクリート表面から反発している時間、 E ：コンクリートの弾性係数、 ν ：コンクリートのポアソン比である。また、ブリネル硬さ試験の考え方に従えば、貫入時間とブリネル硬さには式(3)の関係が成立する⁵⁾。

$$H_B = \frac{f_r}{A_{\max}} = \frac{m\beta^2}{2\pi R} = \frac{m\pi}{8Rt_m^2} \quad (3)$$

ここで、 H_B ：ブリネル硬さ、 f_r ：貫入力、 $A_{\max}$ ：接触面積である。式(2)、式(3)から、質量と半径の比(m/R)が一定となる同一のハンマでは、接触時間はコンクリートの弾性係数 E とブリネル硬さ H_B を反映することが分かる。従って、コンクリート表層部が火害の影響により弾性係数が低下していれば、測定される接触時間は火害の影響のないコンクリート部分での接触時間よりも長くなると考えられる。

2.2 火害を受けたコンクリートの劣化深さの評価方法

火害による劣化部の深さは、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設定し、入力点から受信点に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）により評価し



写真-1 接触時間法の測定状況

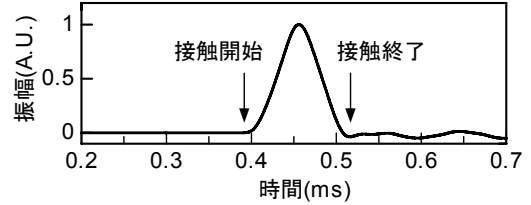


図-1 接触時間法で得られる打撃波形の例

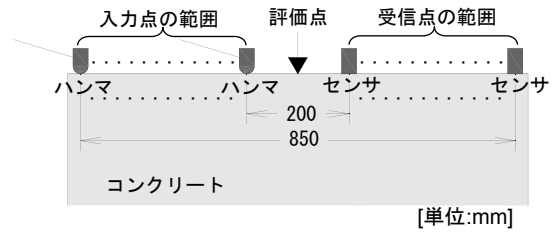


図-2 多点表面伝搬時間差法の測定状況

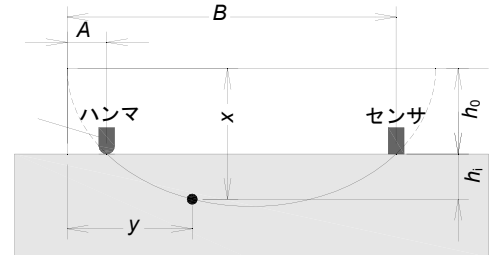


図-3 最初に到達する弾性波の伝搬経路の模式図

た。今回の実験での測定状況を図-2に示す。入力点と受信点の距離は200mmから50mm間隔で850mmまでと複数点設定する方法である。

火害の影響を受けたコンクリートは、受熱温度や加熱後からの経過時間によるが、表面側の弾性波速度が内部よりも低下し、表面からの深さが深くなるにしたがって弾性波速度は大きくなると想定される。なお、コンクリートの表面からの深さと弾性波速度の関係式には、森濱らにより式(4)に示す関係式が提案⁶⁾されており、今回の実験はこの関係式を用いた。

$$V(x) = Kx^{\frac{1}{2m}} = K(h_0 + h_i)^{\frac{1}{2m}} \quad (4)$$

ここで、 K 、 h_0 、 m ：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。 m は正の整数であるが、 m を変化させても解析結果に大きな変化は無く、 m を使い分ける必要はないとされている⁷⁾。ただし、既往の研究では、 $m=5$ として精度よく弾性波速度を推定できることが確認されていることから⁸⁾、今回は $m=5$ とした。

この条件のときに、入力点から受信点に最初に到達する弾性波の伝搬経路の模式図を図-3 に示す。伝搬経路はホイヘンスの原理により導かれ、伝搬経路上の点(x,y)は楕円の周上の点となる。この時、点(x,y)は式(5)の関係となり⁶⁾、伝搬時間は式(6)となる⁶⁾。

$$y = \frac{(2m-1)!!}{(2m-2)!!} a^{2m} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{x^{2m}}{a^{2m}} \right) + \left\{ x^{\frac{2m-1}{2m}} + \sum_{r=1}^{m-1} \frac{(2m-2r+1)!!}{(2m-2r)!!} a^{2r} x^{\frac{2m-2r-1}{2m}} \right\} \sqrt{a^2 - x^{2m}} \quad (5)$$

$$t_{Pcal} = \int_A^B \sqrt{(1+y'^2)/(V^2(x))} dx \quad (6)$$

ここで、 t_{Pcal} ：入力点から受信点に最初に到達する弾性波の伝搬時間、 a 、 m ：定数、 y' ： x に関する y の微分係数、 A ：図-3での楕円の焦点から弾性波の入力点までの距離、 B ：図-3での楕円の焦点から弾性波の受信点までの距離である。以上の性質から、以下に示す1)～5)の手順により定数 K 、 h_0 をそれぞれ求め、これらを式(4)に示す関係式に代入することで、深さ x での弾性波速度 $V(x)$ を求めることが可能となる。そこで、各測線で入力点と受信点の中点を評価点として、各評価点での弾性波速度 $V(x)$ を1)～5)の手順により求めた。

- 1) 入力点と受信点との距離200mmから850mmまでで、入力点から受信点に最初に到達する振動の伝搬時間 t_P を測定する。
- 2) 式(4)の K 、 h_0 を仮定し、 $V(x)$ を求める。
- 3) 式(5)の m を5とし、また a を仮定して、入力点から受信点に最初に到達する振動の伝搬経路を求める。
- 4) 3)で求めた伝搬経路での伝搬時間 t_{Pcal} を式(6)により求める。
- 5) 2)～4)の計算を繰返し、 t_P と t_{Pcal} との誤差が最小となる K 、 h_0 を決定する。

周知のとおり、弾性波速度はコンクリートの弾性係数の低下に加えてひび割れの発生によっても変化することから、火害により劣化したコンクリートでは弾性波速度は低下すると考えられる。このことから、得られたコンクリートの表面からの深さと弾性波速度の関係式から、火害による劣化部の深さを推定することを検討した。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体の外観状況を図-4 に示す。表-1 に示す配合の生コン工場で製造された30-18-20Nのコンクリートにより、長さ1200mm×幅900mm×厚さ400mmの供試体を作製した。鉄筋は、打設面と対向する面となる型枠底面から50mmの位置にD10鉄筋を設置した。

熱電対は、図-4中の○印の位置にそれぞれ設置した。設置した深さは、それぞれ、コンクリート表面から10、20、30、50、100、200、300mmの7箇所である。

3.2 加熱試験

加熱面は型枠底面であり、加熱範囲は図-4 に示す赤色の範囲(300mm×300mm)に設定した。加熱時の材齢

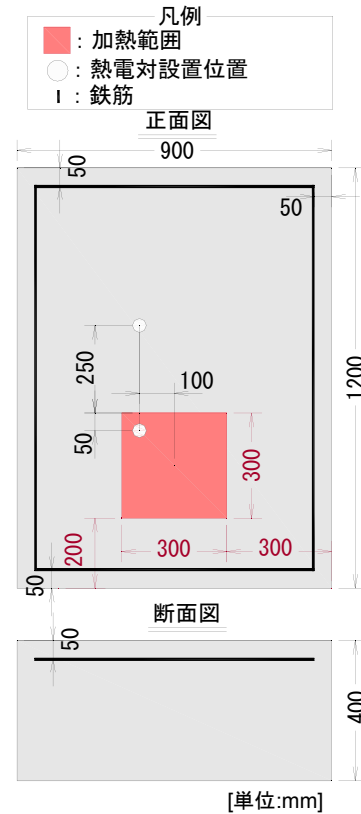


図-4 供試体の外観
表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
53.1	48.8	170	321	871	945	3.21

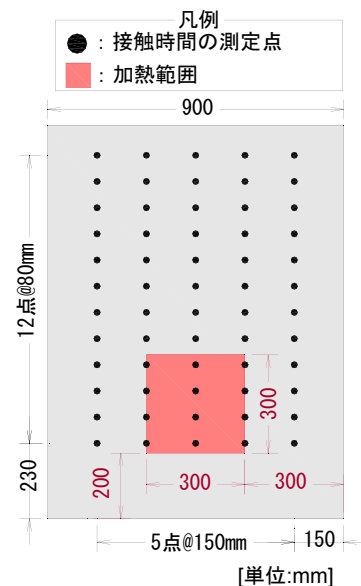


図-5 接触時間の測定点の設定状況

は7週である。加熱条件はガス炉にて40分で炉内温度を600℃まで昇温し、600℃を280分間保持する計画とした。温度は炉内とコンクリート内部に設置した熱電対により確認して、調整した。加熱範囲以外のコンクリート表面には、有機結合材を含まないセラミックファイバーを堆積しながらニードル加工した厚さ25mmの断熱材を2枚重ね合わせて設置した。コンクリート面に直接接触する断熱材(1層目)は、加熱面周辺部に耐熱セメントを塗布することで接着した。その上に覆い被せた2層目の断熱材は、針金を用いて1層目と結合させた。以上の方法で、コンクリート表面が直接加熱されないよう工夫した。なお、加熱後はコンクリート表面の温度が常温となるまで自然冷却させた。

3.3 接触時間法

測定点の設定状況を図-5に示す。測定点は長さ方向に80mm間隔、幅方向に150mm間隔とし、格子状に計60点設定した。測定は1測定点につき可能な限り近接する20点で行った。20点の測定値の加算平均値を求め、偏差が平均値の20%以上になる測定値を棄却して、再度、加算平均値を求める処理により測定値を決定した。この平均処理は測定される接触時間はコンクリートの性状以外にも、打撃力によっても若干の変化が生じることから、この影響を低減させたための処理である。使用したセンサは周波数範囲(±1dB)が0.4~10000Hzの衝撃加速度計である。ハンマのコンクリートに接触する打撃部の質量は、センサを含め18gである。打撃部の球冠半径は7.5mmである。なお、サンプリング時間間隔は0.5μsとした。

接触時間は、図-6に示すとおり、打撃波形を微分した波形の周波数スペクトルを求め、この卓越周波数の逆数から決定した⁹⁾。接触時間は図-1に示した打撃波形から、ハンマとコンクリートが接触を開始した時刻と終了した時刻をそれぞれ読み取れば測定されるが、打撃波形での読み取りは、測定者の主観に影響されることも考えられる。図-6に示す方法としたのは、客観的かつ一義的に接触時間を決定するためである。

3.4 多点表面伝搬時間差法

測線の設定状況を図-7に示す。測線は長さ方向に80mm間隔で12測線を設定した。接触時間法で使用した球冠半径が7.5mmのハンマにより入力点を打撃し、受信点に設置した圧電型加速度計で受信波形を得た。使用した圧電型加速度計は、感度が10mV/(m/s²)、周波数範囲(±3dB)が0.2Hz~20000Hzである。ハンマに内蔵したセンサで測定した打撃波形での振動の開始時刻と、受信波形に最初に振動が到達した時刻をそれぞれ目視で読み取った。これら両時刻の差を入力点から受信点に最初に到達する弾性波の伝搬時間とした。サンプリング時間間隔は入力・受信いずれの場合も0.5μsに設定した。

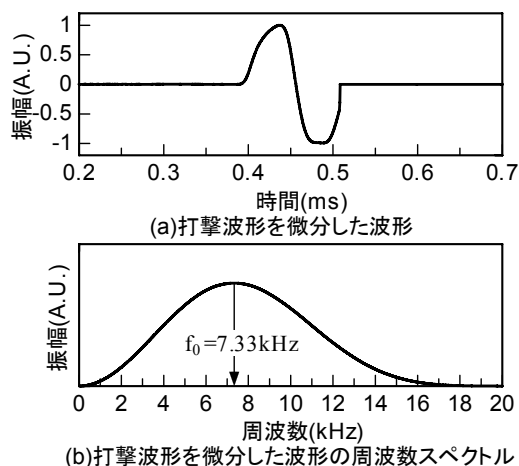


図-6 周波数解析による接触時間の測定例

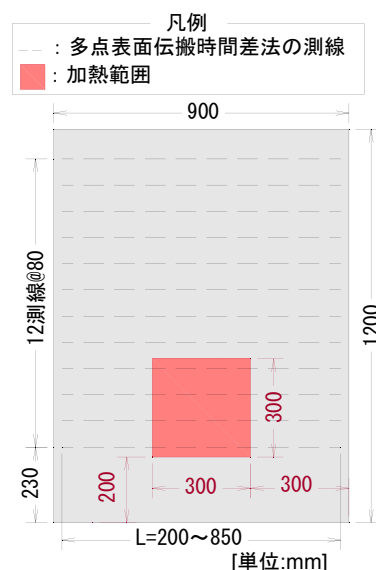
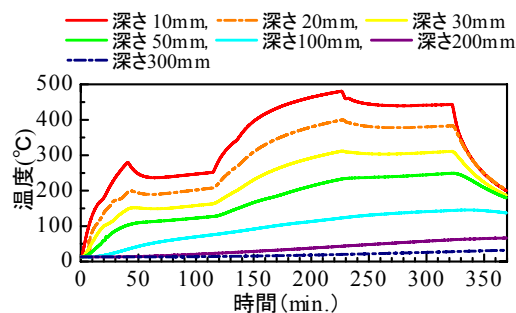


図-7 多点表面伝搬時間差法の測線の設定状況

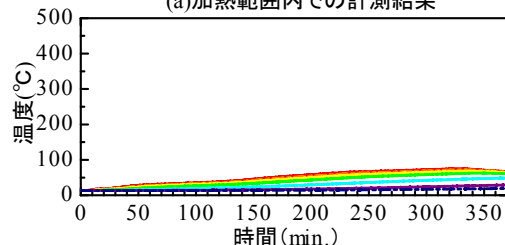
4. 実験結果

4.1 加熱試験

コンクリートの内部に設置した熱電対で計測した温度の経時変化を図-8に示す。加熱面の最高温度は深さ10mmで490℃程度であり、深さ100mmでは100℃程度であった。また、深さ200mmの最高温度は50℃程度であるが、時間経過により温度が高くなっており、加熱による変化が確認される。一方、加熱範囲外での最高温度はすべて100℃未満であった。ただし、深さ10mm~100mmで時間経過により温度が高くなっており、加熱による温度の変化が確認される。なお、当初の計画した加熱条件ではコンクリート内部の温度が上がらず、コンクリート加熱面から深さ10mmの位置での温度が低下後、250℃付近で一定になった。そこで、加熱時間100分以降に、炉内温度を上昇させた。その際、コンクリート内部の温度を確認しながら炉内の温度調整を行い、深さ10mm位置が500℃に近づくように制御した。



(a)加熱範囲内での計測結果



(b)加熱範囲外での計測結果

図-8 深さ方向の最高温度

表-2 加熱後の接触時間の測定結果
(上段：接触時間(μs), 下段：加熱前の平均値との比率)

接触時間 測定結果		右端面からの距離(mm)				
		750	600	450	300	150
下端面からの距離(mm)	1110	138.9	143.2	142.3	138.0	140.5
		0.995	1.026	1.020	0.989	1.007
	1030	136.3	137.5	141.2	139.9	136.1
		0.977	0.985	1.012	1.002	0.975
	950	137.1	142.9	141.8	135.2	138.0
		0.982	1.024	1.016	0.969	0.989
	870	136.2	142.9	141.8	140.1	138.1
		0.976	1.024	1.016	1.004	0.990
	790	145.1	143.4	138.1	138.1	138.2
		1.040	1.028	0.990	0.990	0.990
	710	143.8	147.8	139.9	138.6	139.2
		1.030	1.059	1.002	0.993	0.997
	630	146.9	142.4	140.3	138.4	138.4
		1.053	1.020	1.005	0.992	0.992
	550	140.9	149.2	144.4	144.0	137.0
		1.010	1.069	1.035	1.032	0.982
	470	139.7	146.4	157.8	145.1	135.0
		1.001	1.049	1.131	1.040	0.967
	390	141.8	156.4	169.5	141.2	134.4
		1.016	1.121	1.215	1.012	0.963
	310	138.1	153.9	171.6	152.1	137.9
		0.990	1.103	1.230	1.090	0.988
	230	138.9	150.8	163.9	150.7	134.7
		0.995	1.081	1.174	1.080	0.965

■：比率が1.040以上となった測定点。

4.2 接触時間法

各点の接触時間の測定結果を表-2, 図-9に示す。なお, 加熱前にも同一点で接触時間を測定し, 全60点の平均値は139.6μs, 標準偏差は3.2μsであった。表-2には, 各点の接触時間を加熱前の平均値で除した比率も示した。測定結果より, 表-2中赤枠で示した加熱範囲内では, 比率の最大値が1.230となり, 接触時間は加熱前の平均値よりも長くなった。加熱の影響により弾性係数が低下して, 測定原理に示したとおりに, 測定される接触時間が長くなった。比率に着目すると, 加熱範囲内では, 12測定点中11点で1.040以上となった。加熱範囲外では, 長さ方向に550mm~790mm, 幅方向に600mm~750mm

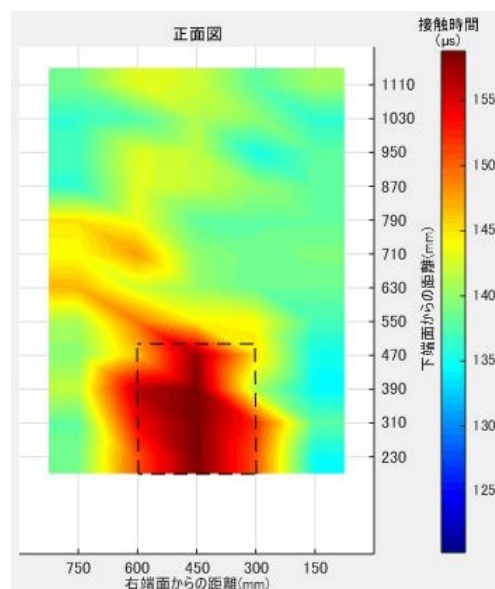


図-9 加熱後の接触時間の測定結果のコンター図
(□：加熱範囲)

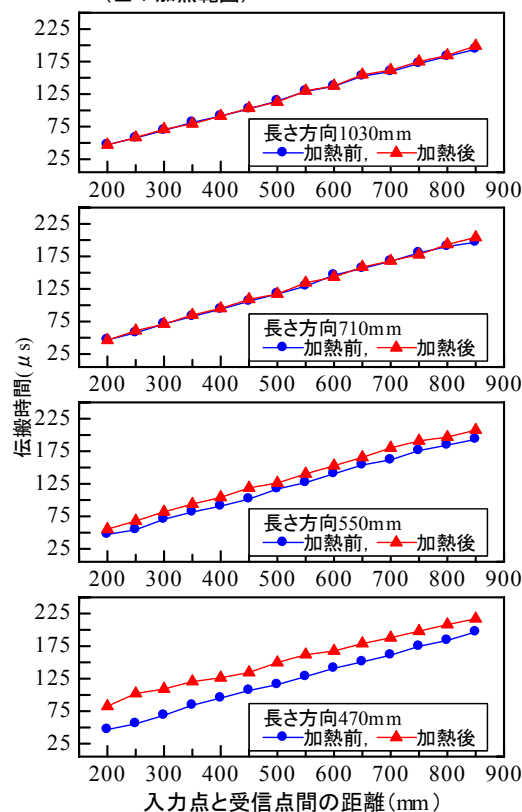


図-10 伝搬時間の測定結果例

の4測定点で比率は1.040以上となり, その他の測定点は0.963~1.035であった。また, 図-9に示したコンター図では, 接触時間が長くなる測定点は赤く表示され, この範囲を視覚的に捉えることができる。なお, このコンター図で表示した結果の最小値は, 加熱前の全60点の平均値から標準偏差の3倍を引いた値, 最大値は平均値に標準偏差の3倍を加算した値とした。

4.3 多点表面伝搬時間差法

加熱前と加熱後に測定された伝搬時間の一例を図-10に示す。図-10は縦軸に伝搬時間, 横軸に入力点と受信

点間の距離を示した。図-10より、先ず、加熱前の測定結果に着目すると、伝搬時間と入力点と受信点間の距離は直線比例関係を示した。測定された弾性波の伝搬経路はコンクリート表面であり、直線比例関係の勾配が弾性波速度を示している。次に、長さ方向に1030mmの測線、長さ方向に710mmの測線の測定結果に着目すると、加熱前後で測定された伝搬時間に差が生じていない。この結果からは、これらの測線での弾性波の伝搬経路は加熱前と同様にコンクリート表面であり、火害による劣化が生じていないと判断される。一方、加熱範囲の端面から50mm離れた長さ方向に550mmの測線と、加熱範囲内の長さ方向に470mmの測線では、加熱後の伝搬時間が、加熱前と比較して大きくなった。また、加熱前の伝搬時間と加熱後の伝搬時間の差を見ると、例えば、長さ方向に470mmの測線では、入力点と受信点間の距離250mmでは約50 μ sであるのに対して、距離850mmでは約25 μ sであり、入力点と受信点間の距離が長くなるのに従い、差が小さくなった。伝搬時間と入力点と受信点間の距離の直線比例関係が、加熱により変化している。弾性波の伝搬経路はコンクリート表面ではなく、図-3の模式図に示す経路に変化したと考えられる。同様の結果は長さ方向に230mm～550mmの5測線で得られた。

これらの長さ方向に230mm～550mmの5測線で、式(4)に示す定数の K 、 h_0 を求め、加熱面となるコンクリート表面からの深さと弾性波速度の関係式を得た。この関係式から算出した各加熱面からの深さでの弾性波速度を図-11に示す。また、比較のためこれらの5測線以外の伝搬時間の平均値から算出した弾性波速度を、非劣化部の速度として示した。なお、弾性波速度の算出は、非劣化部の速度となる深さまでとしている。図-11より、長さ方向に230mm～470mmの測線では、ほぼ一致する関係式が得られた。弾性波速度が非劣化部の速度と一致する深さは258mmである。長さ方向に550mmの測線では弾性波速度が非劣化部の速度と一致する深さは61mmとなった。なお、弾性波速度が低下する原因としては、コンクリートの火害による劣化以外にも乾燥による影響が考えられる¹⁰⁾。既往の研究では、乾燥により弾性波速度が3%程度低下することが確認されている¹¹⁾。これに対して今回の弾性波速度は、図-11より、広範囲で非劣化部の弾性波速度より3%以上低下していた。このことから、今回の実験では火害による劣化の影響が大きいと考えられる。

5. 火害を受けたコンクリートの面的な劣化範囲および劣化深さの評価方法に関する考察

4章に示した接触時間法および多点表面伝搬時間差法により火害を受けたコンクリートの面的な劣化範囲および劣化深さをそれぞれ評価可能か検証するために、側面

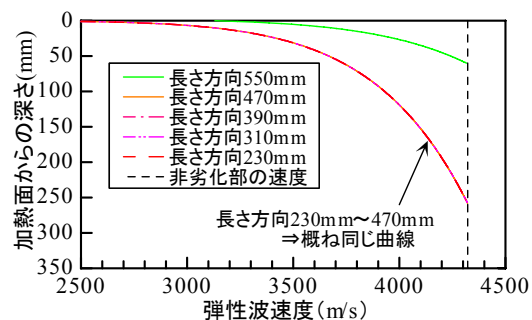


図-11 加熱面からの深さと弾性波速度の推定結果

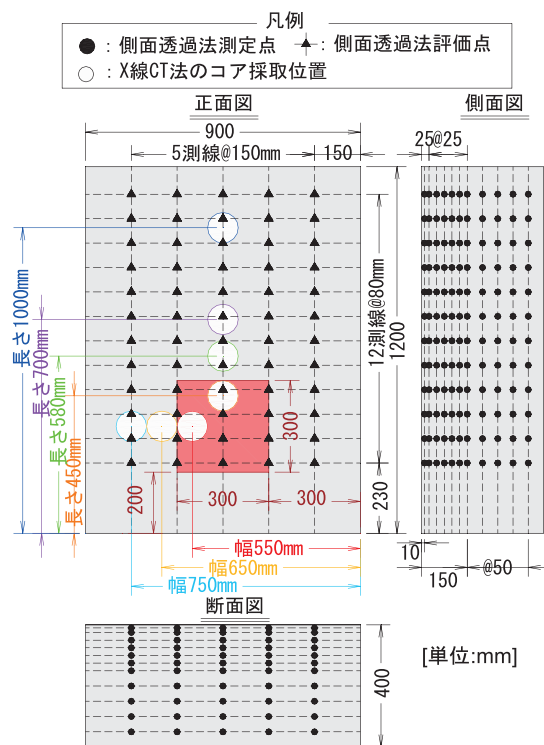


図-12 比較検証した試験方法の測定位置

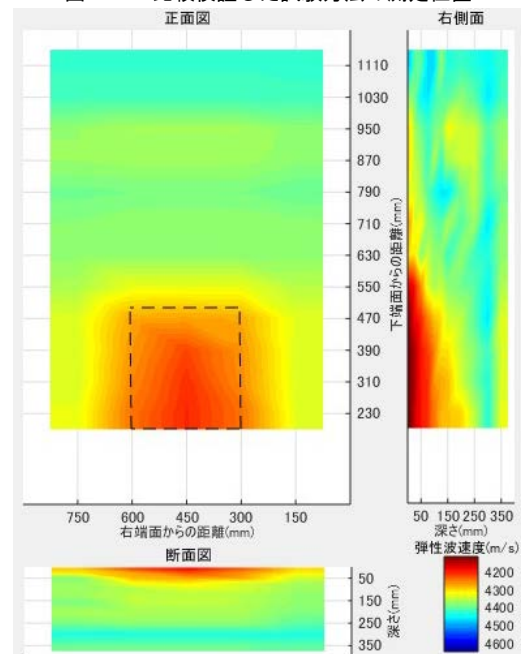


図-13 側面透過法による各評価点の弾性波速度の平均値 (□：加熱範囲)

透過法 (5.1 項参照), X 線 CT 法 (5.2 項参照) およびコア採取による目視観察 (5.3 項参照) を行った。ここでは, これらの試験方法および結果を述べるとともに, 接触時間法および多点表面伝搬時間差法で得られた結果と比較・検証 (5.4 項～5.5 項) した。

5.1 側面透過法

側面透過法の測定点を図-12 に示す。ここで使用した加速度計およびサンプリング時間間隔は, 多点表面伝搬時間差法と同じである (3.4 参照)。弾性波速度を長さ方向の 12 測線と幅方向の 5 測線の 2 方向で測定した。いずれの測線においても, 加熱面からの深さを 10mm, 25mm, 50mm, 75mm, 100mm, 125mm, 150mm, 200mm, 250mm, 300mm, 350mm の位置 (図中の●印) で測定した。各深さにおいて, 両方向の測線が交差する点を評価点 (図中の▲印) とし, 各評価点の弾性波速度を決定した。4.2 項に結果を示した多点表面伝搬時間差法では, 片側表面からの測定で各深さの弾性波速度を推定しているのに対して, 側面透過法は, 実構造物では適用できない方法であるが, 供試体の平面および深さ方向の速度構造を評価できる。

各評価点の弾性波速度は, 長さ方向, 幅方向の両方向で測定した弾性波速度のうち大きい方の弾性波速度を採用した。これは, 例えば, 評価点が健全であるが, 幅方向の弾性波の伝搬経路中に火害による劣化部が存在すれば, 幅方向の弾性波速度は低下し, 長さ方向の弾性波速度は正常値となる。これに対して, 評価点が火害による劣化部であれば, 両方向の弾性波速度ともに低下することとなる。このことから, 両方向の弾性波速度の平均値等では, 他の評価点での劣化の影響により, 劣化部の範囲を正確に判断できないものと考えられる。以上の理由から, 両方向の弾性波速度の最大値を採用した¹²⁾。

側面透過法の測定結果を図-13 に示す。図-13 は各評価点の弾性波速度を, 図示方向に平均値を求め, コンター表示で示した結果である。例えば, 正面図の幅方向 750mm, 長さ方向 230mm の結果は, この位置での深さ 10mm～350mm の各評価点での弾性波速度の平均値である。また, 断面図の幅方向 750mm, 深さ 10mm の結果は, この位置での長さ 230mm～1110mm の各評価点での弾性波速度の平均値である。従って, 例えば, 同じ深さ位置であっても長さ 230mm～1110mm の各評価点での弾性波速度の平均値を示した断面図と, 幅 150mm～750mm の各評価点での弾性波速度の平均値を示した右側面とではコンター表示の結果は異なる。図-13 より, 深さ 100mm 程度まで弾性波速度が低下している平面範囲は, 加熱範囲内だけでなく, 長さ方向では 230mm～550mm, 幅方向では 150mm～750mm である。また, 加熱範囲内で弾性波速度が低下している深さは 200mm 程度であった。

5.2 X 線 CT 法

X 線 CT 法¹³⁾では, 採取したコア供試体を X 線 CT 装

置にて管電圧 210kV, 管電流 100 μ A の条件で撮影した。3 次元画像を構成する要素(voxel)を一边 0.123mm の立方体として, ノイズ処理を目的とした平滑化処理を加えた再構成により, 3 次元画像を得た。この後, 深さ方向に約 10mm 毎に含まれる CT 値の頻度分布を算出した。CT 値とは, 再構成により推定された各 voxel 内の X 線吸収係数の値を空気を-1000, 水を 0 として相対的に示した数値である。CT 値は材質や密度により変化することから, CT 値の差により受熱により品質変化が生じた範囲を判断できる¹³⁾と考えられる。コア供試体を採取した位置を図-12 に示す。加熱範囲の中心位置から長さ方向に離れた 4 箇所と, 幅方向に離れた 3 箇所である。以降では, 方向と供試体端面からの距離をコアの名称として示す。

X 線 CT 法の試験結果を図-14 に示す。なお, コア供試体間での個体差も考えられることから, 各コア供試体の各深さにおいて, 同一のコア供試体での CT 値の最大値からの低下量を求めた。これは, CT 値が最大値となった箇所は, 図-8 (a) で受熱温度が低く, 品質変化がほぼないと考えられたためである。図-14 は, これを CT 値の変化量として示した図である。長さ 1000mm の位置では, 加熱による影響が小さいと予想されることから, 加熱前の性状を表していると考えられる。この位置では, 加熱面からの深さ 0mm では-40 程度で, 深くなると 0～-55 で変動し, 深さ 380～400mm では-90～-55 となった。深さ 380mm までの変動の主な要因として骨材の配置が考えられる。また, 深さ 380mm より深い範囲は, 打設面付近であるため, ブリーディングによる影響だと考え

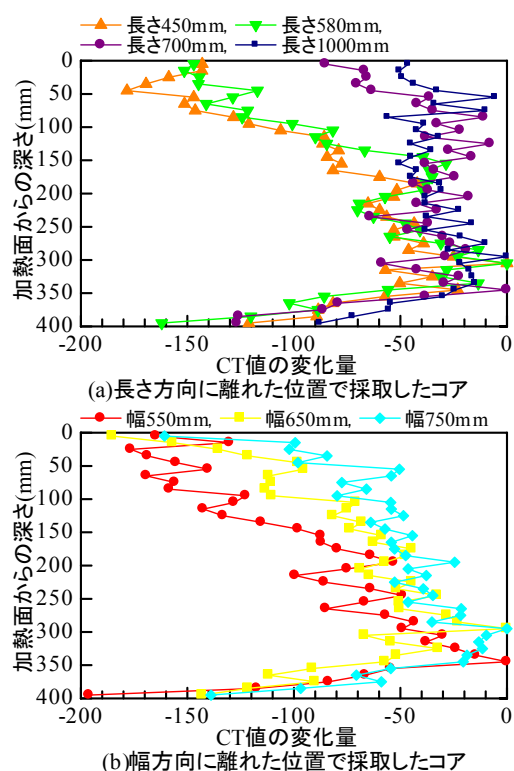


図-14 各コア供試体の深さ方向の CT 値の変化量

られる。一方、その他のコア採取位置では、深さ 0mm での CT 値が加熱範囲に近接するほど低下していた。また、加熱面からの深さ 350mm までは深いほど CT 値の低下量が小さくなった。なお、加熱範囲付近では、深さ 350mm～400mm の範囲で長さ 1000mm の位置よりも CT 値の低下量が大きくなった。これは、ブリーディング以外に、供試体下面から加熱したため、打設面である上面方向に水分が移動し、逸散した可能性が考えられる。以上から、CT 値が-50 以上の低下が見られた箇所が受熱により品質変化が生じた箇所だと考えられる。この受熱により品質変化が生じた箇所が劣化部であると判断すると、劣化部は、加熱範囲では深さ約 200mm であり、加熱端部から離れるほど浅くなり、加熱範囲の端部から 250mm まで影響したと考えられる。

5.3 採取したコアの目視観察

加熱範囲内である幅 550mm のコアの外観状況を写真-2 に示す。同コアの X 線 CT 法による断面画像の一部を写真-3 に示す。加熱面の表面には、微細なひび割れが複数発生していた。ただし、側面では、変色は確認されるものの、開口ひび割れは確認されなかった。また、写真-3 においても、写真-3(a)の深さ 0.5mm で確認されるひび割れは、写真-3(b)の深さ 8.6mm では確認されなかった。

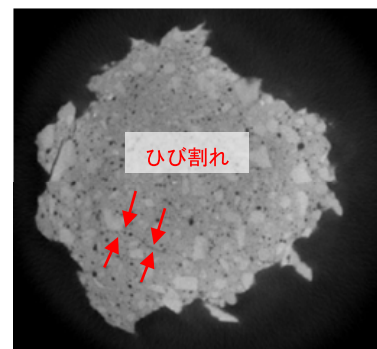
以上 5.1 項～5.3 項の結果より、側面透過法および X 線 CT 法の結果では、劣化部の範囲は、面方向に加熱範囲の外側まで、深さ方向に加熱範囲内で 200mm 程度であると評価された。一方、目視観察では、加熱したコンクリート面にひび割れの発生は確認できたものの、深さ方向には進展していなかった。

5.4 接触時間法の検証

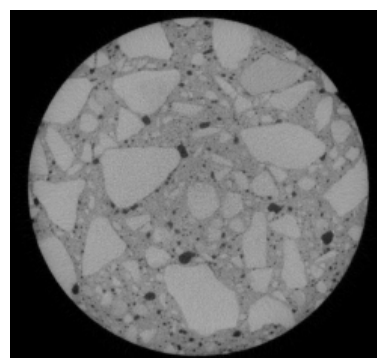
加熱後に測定された接触時間が加熱前と比較して小さくなった測定点は、加熱範囲内で 12 測定点中 11 点であり、加熱範囲外では 4 測定点であった。これに対して、深さ 10mm で測定された側面透過法による弾性波速度（表-3 参照）が 4300m/s 以下に低下した評価点は、長さ方向に 550mm までの全 25 評価点であり、このうち加熱範囲外では 13 評価点であった。また、X 線 CT 法では加熱範囲外の幅 750mm でも深さ 100mm 程度まで CT 値の変化量が低下していた。以上の結果から、接触時間法は、火害による劣化部の範囲をより直接的に確認できる他の試験方法と比較して、劣化部の面的な範囲を狭く推定する可能性が考えられる。この原因を検討するため、接触時間法の測定値と同一地点の深さ 10mm で測定した側面透過法による弾性波速度との比較を図-15 に示す。なお、図-15 には加熱前の測定結果も示した。まず、側面透過法による弾性波速度に着目すると、加熱前の全 60 点の弾性波速度は約 4350m/s～約 4450m/s であり、平均値は 4404m/s、標準偏差は 25.3m/s であった。これに対して、加熱後の弾性波速度は、前述のとおり 25 点で 4300m/s



写真-2 採取したコアの外観状況（採取位置：幅 550mm）



(a) 深さ 0.5mm



(b) 深さ 8.6mm

写真-3 コアの X 線断面画像例（採取位置：幅 550mm）

以下に低下した。次に、接触時間の測定結果は、加熱前は約 135 μ s～約 145 μ s であり、平均値は 139.6 μ s、標準偏差は 3.2 μ s であった。これに対して、加熱後の接触時間は最大で約 170 μ s まで変化した。両測定結果を比較すると、加熱後に 4300m/s 以下に低下した弾性波速度と接触時間には、弾性波速度が低下するほど接触時間が大きくなる相関関係が確認される。接触時間は、測定原理に示したとおり、コンクリートの弾性係数とブリネル硬さを

反映することから、弾性波速度と相関関係があると考えられる。ただし、今回の相関関係では、加熱後に弾性波速度が 4300m/s 程度に低下した測定点の接触時間は 140 μ s 程度である。これは加熱前および弾性波速度が低下していない測定点の接触時間と同程度であり、接触時間が 140 μ s 程度であっても火害による劣化部とは判別できない。接触時間が明らかに変化し、火害による劣化部と判別できるのは 150 μ s 程度以上であるが、この時の弾性波速度は約 4150m/s 以下、平均値から 5%程度の低下である。以上より、接触時間は劣化の程度が軽微であれば、試験方法の測定精度による誤差により劣化部として判別することが困難になると考えられる。これにより、火害による劣化部の範囲をより直接的に確認できる他の試験方法と比較して、劣化部の面的な範囲を狭く推定したものと考えられる。今回の実験結果では、接触時間で劣化部と判別されたのは、側面透過法による弾性波速度が 5%以上低下する測定点であった。

5.5 多点表面伝搬時間差法の比較結果

まず、多点表面伝搬時間差法の試験結果と側面透過法の試験結果を比較する。図-13 より、側面透過法で測定された弾性波速度が低下していた深さは、長さ方向に 230mm~470mm の範囲では深さ 200mm 程度まで、長さ方向に 550mm では深さ 50mm 程度までであった。これは、図-11 に示した、多点表面伝搬時間差法で非劣化部の速度が得られる深さと概ね一致する。また、多点表面伝搬時間差法で得られた各加熱面からの深さでの弾性波速度と、側面透過法で得られた弾性波速度との比較を図-16 に示す。なお、両弾性波速度とも、非劣化部の速度で除した比率で示している。図-16 より、両者に相関関係が確認される。また、多点表面伝搬時間差法の方が、加熱の影響により弾性波速度が大きく低下することが確認される。これは、側面透過法は、非劣化部を含めた伝搬経路の平均的な弾性波速度が測定されるのに対して、多点表面伝搬時間差法は、極小範囲の弾性波速度が推定されていることによる。以上の結果より、多点表面伝搬時間差法は片側表面からの測定で深さ方向の弾性波速度を推定しているが、直接深さを変化させて測定する側面透過法よりも、分解能を向上させて、火害による劣化部の深さを推定できると考えられる。

次に、多点表面伝搬時間差法の試験結果と X 線 CT 法の試験結果を比較する。X 線 CT 法で CT 値の変化量が -50 以下となり、劣化部と考えられるのは図-14 より、長さ方向に 450mm、580mm で採取したコアでは深さ 200mm 程度まで、長さ方向に 700mm で採取したコアでは深さ 40mm 程度までである。長さ方向に 1000mm で採取したコアではこの劣化は確認されなかった。図-11 に示した多点表面伝搬時間差法で非劣化部の速度が得られる深さと比較すると、長さ方向に 450mm では概ね一致する。ただし、長さ方向に 580mm、700mm では多点表面伝搬

表-3 側面透過法による弾性波速度の測定結果

加熱後 深さ10mm		右端面からの距離(mm)				
		750	600	450	300	150
下端面からの距離(mm)	1110	4512	4512	4512	4512	4512
	1030	4424	4424	4424	4424	4424
	950	4353	4353	4353	4353	4353
	870	4353	4353	4353	4353	4353
	790	4381	4381	4381	4381	4381
	710	4326	4326	4326	4326	4326
	630	4353	4353	4353	4353	4353
	550	4275	4167	4167	4167	4295
	470	4275	4092	4080	4129	4295
	390	4275	4092	3947	4129	4295
	310	4275	4092	3938	4129	4295
	230	4275	4092	3996	4129	4295

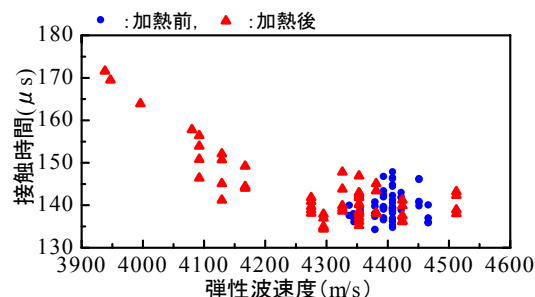


図-15 接触時間と側面透過法による弾性波速度との比較

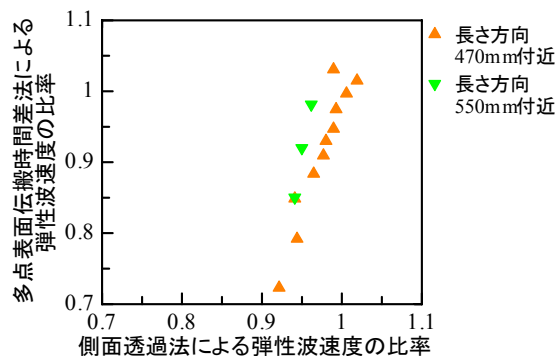


図-16 多点表面伝搬時間差法と側面透過法との比較

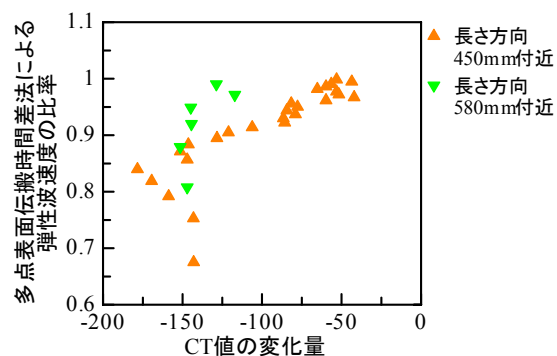


図-17 多点表面伝搬時間差法と X 線 CT 法との比較

時間差法は、X 線 CT 法で評価される劣化部の深さよりも浅く評価する結果である。この結果から、直接加熱した範囲外では、多点表面伝搬時間差法は、X 線 CT 法で評価される劣化部の範囲よりも劣化部を浅く評価し、特に、X 線 CT 法で劣化部の深さが 50mm 程度未満と評価される場合には、劣化部と判断できないことが考えられる。また、多点表面伝搬時間差法で得られた各加熱面か

らの深さでの弾性波速度と、X線CT法で得られた各加熱面からの深さでのCT値の比較を図-17に示す。図-17はX線CT法でCT値を測定した深さでの弾性波速度を式(4)の関係式から算出し、比較した結果である。なお、算出した弾性波速度は非劣化部の速度で除した比率で示している。図-17より、今回の実験では、CT値-50以上の低下が見られた場合の弾性波速度は、比率が0.95以下に低下していた。今後もこの様な比較データを蓄積することにより、多点表面伝搬時間差法による劣化部の深さの推定での判定基準の設定が可能になると考えられる。

6. まとめ

衝撃弾性波法により、火害を受けたコンクリートの加熱面側の片側表面から劣化部の面的な範囲と深さを推定する評価方法について、実験による基礎的な検討を行った。実験では、接触時間法により火害による劣化部の面的な範囲を、多点表面伝搬時間差法により火害による劣化部の深さを推定する方法を検討し、これらとX線CT法、側面透過法およびコア採取による目視観察での結果を比較した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 接触時間法の測定値である接触時間は、コンクリートの弾性係数とブリネル硬さを反映することから、火害による劣化部の面的な範囲を評価できる可能性があることがわかった。
- 2) ただし、接触時間法は、火害による劣化の程度が軽微であれば、試験方法の測定精度による誤差との判別が困難であった。これにより、他の試験方法と比較して、劣化部の面的な範囲を狭く推定する。今回の実験では、表面から深さ50mmの位置で側面透過法による弾性波速度が5%以上低下する範囲を推定することが可能であった。
- 3) 多点表面伝搬時間差法の測定値である弾性波速度は、コンクリートの弾性係数を反映し、かつ深さ方向の弾性速度構造を評価できることから、火害による劣化部の深さを評価できる可能性があることが示唆された。
- 4) 多点表面伝搬時間差法は、X線CT法と比較すると、加熱範囲内では同等の結果が得られた。ただし、加熱範囲外では、劣化部の範囲をX線CT法よりも狭く判断すること、また、X線CT法で劣化部の深さが50mm程度未満と評価される場合には劣化部と判断できないことがわかった。

今回の実験結果において、衝撃弾性波法による片側表面からの測定により、コンクリートの性状を示す測定値

を平面および深さ方向で測定できることが確認された。これにより、火害による劣化部の面的な範囲および深さを推定できる可能性が示された。今後は、より定量的な試験方法を提案できるよう、衝撃弾性波法による測定値と加熱温度や化学分析から判断したコンクリートの材質の変化との対応関係を検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は、NEXCO 東日本技術研究助成の援助を受けて行ったものである。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'12〔基礎編〕、pp.177-180, 2012.2
- 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、p.1, 2015.2
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.97 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集、pp.407-408, 2012.7
- 4) 岩野聡史・森濱和正：コンクリート構造物表層の品質評価装置の開発、セメント・コンクリート、No.797, pp.36-41, 2013.7
- 5) 渡辺健・岩野聡史・境友昭・大島義信：コンクリート表層品質に関する試験方法と規格、非破壊検査、Vol.64, No.9, pp.451-456, 2015.9
- 6) 例えば、土木研究所・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) 森濱和正：超音波法によるコンクリート構造物検査方法の提案—コンクリートの品質、部材厚さ、鉄筋かぶり・径の推定—、土木技術資料、Vol.43, No7, pp.64-69, 2001.7
- 9) 前掲書 3), pp.203-204
- 10) 日本非破壊検査協会：NDIS 2426-2：2014 コンクリートの非破壊試験—弾性波法—第2部：衝撃弾性波法、pp.67-69, 2014.9
- 11) 伊藤順紀・岩野聡史・坂本良憲・森濱和正：衝撃弾性波法による弾性波速度の測定に及ぼす含水量の影響、日本非破壊検査協会平成22年度秋季大会講演概要集、pp.145-148, 2011.10
- 12) 岩野聡史・實藤大夫・堀口賢一・梁俊・森濱和正：複数経路での弾性波速度の測定によるコンクリート内部欠陥探査方法の検討、日本非破壊検査協会シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集（Vol.4）、pp.447-452, 2012.8
- 13) 麓隆行・水野諭・小澤満津雄：加熱を受けたモルタル内部における連続的な劣化変化の推定へのX線CTの適用性、コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集、Vol.15, pp.241-246, 2015.10

（原稿受理年月日：2016年7月8日）

Fundamental Study on Deterioration Estimation Method of Fire-Damaged Concrete by the Impact Elastic Wave Method.

By Satoshi Iwano , Shinya Uchida , Takayuki Fumoto and Mitsuo Ozawa

Concrete Research and Technology, Vol.28, 2017

Synopsis: The purpose of this study was to investigate a method to estimate the deterioration area of fire-damaged concrete by the impact elastic wave method, performing measurement from the surface of the concrete. Based on the findings of this study, it is considered that the measured contact time between the surface of the concrete and the hitting hammer can be used to estimate the area of deterioration on the surface, and that multipoint measurement of the propagation time of the elastic wave on the surface of the concrete can estimate the depth of deterioration. However, the estimation accuracy was found to be lower in the case of slight deterioration.

Keywords: Fire-Damaged Concrete, Non Destructive Test, Impact Elastic Wave Method, X-ray CT Method, Contact Time, Propagation Time, CT Value