

超音波スペクトロスコピーによる 加熱を受けたコンクリートの劣化度評価

山 田 和 夫

Quality Evaluation of Concrete exposed to High Temperature by Ultrasonic Spectroscopy

Kazuo YAMADA

In this study, the ultrasonic spectroscopy was applied to evaluate quality of concrete exposed to high temperature conditions, as one step to establish a new non-destructive testing technique for concrete and mortar.

The main results obtained in this study are summarized as follows:

1) Compressive and flexural strengths of concrete decrease according to temperature rise, especially the flexural strength of mortar is sensitively affected by temperature rise.

2) Ultrasonic pulse velocity, maximum amplitude and energy of measured ultrasonic pulse wave decrease according to temperature rise, but energy moment and energy dispersion increase, independent of the water-cement ratio of test specimen.

3) Maximum amplitude and energy of frequency transfer function of concrete decrease with increase of temperature, and these decreasing rate is hardly affected by water-cement ratio and heating duration.

4) Local maximum amplitude and energy of the frequency transfer function in frequency ranges of 50-100 kHz and 200-250 kHz are closely related to change of internal structure of concrete exposed to high temperature.

1. まえがき

超音波を用いて材料内部のひび割れ、空隙、異物などの欠陥を非破壊的に探査する方法は、すでに早くから実用化されており、最近では材料の破壊過程の追跡や、劣化度の診断など、超音波法の活用範囲はますます広がってきている。しかし、コンクリートの場合、金属材料などに比べて材質が著しく不均質であるため、伝播する超音波の減衰が著しく、検出が困難なこともあって、その利用は他材料の場合に比べて著しく立ち遅れており、せいぜい内部ひび割れや空隙の探査、あるいは音速とコンクリート強度との相関を利用した強度の推定などに用いられているにすぎない¹⁾。

しかし、最近では、電子計測技術の発達に伴って、材料中を伝播する微弱な信号の検出が可能になって

きたこと、伝播波形の解析技術が向上したこと、などによりコンクリートの非破壊試験のための超音波の高度の利用研究が次第に増加しつつある²⁾⁻⁵⁾。

O. Gericke⁶⁾が、金属材料の内部欠陥探査のために提案した超音波スペクトロスコピー法は、材料中を伝播した超音波の波形に、材料特性に関わる各種情報が包含されていることに着目して、伝播波の詳細な波形解析により、材料の内部構造を調べようとするものであって、最近コンクリート分野への応用研究も見られるようになった。しかし、研究はまだ緒についたばかりであって、とくにコンクリートの内部損傷度の評価に関する系統的な研究はほとんどみあたらない。

筆者も、超音波スペクトロスコピーによるコンクリートの劣化度診断のための一連の基礎的研究⁵⁾を

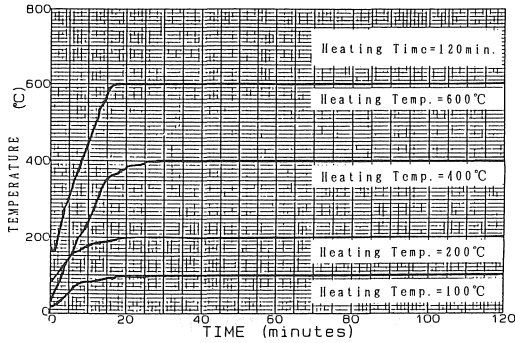


Fig. 1 Relation between heating temperature and time.

(Mortar, W/C: 70%, Heating time=120min.)

行ってきたが、本論は、その延長上にある加熱を受けたコンクリートの劣化度評価に関する基礎的研究の報告である。

2. 実験方法

2・1 実験の概要

種々の加熱履歴を受けた各種調合のモルタルおよびコンクリート試験体を用いて、試験体中を伝播した超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とモルタルおよびコンクリートの劣化度との関係を調べた。超音波諸特性値以外の実験要因は、試験体の材種(モルタルおよびコンクリートの2種類)、水セメント比(W/C=50, 60および70%の3種類)、加熱温度(無加熱, 100, 200, 400および600°Cの5種類)、加熱持続時間(15, 30, 60および120分の4種類)並びに曲げおよび圧縮強度(JIS R 5201による)である。加熱温度と加熱時間との関係の一例を Fig. 1 に示す。なお、加熱温度の評価および制御は、本来ならば試験体温度により行うべきであるが、試験装置の制約のために、それぞれ炉内温度および手動で行った。

2・2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作には、普通ポルトランドセメント、天竜川産の川砂(最大粒径=1.2mm, 表乾比重=2.60)および天竜川産の川砂利(最大粒径=10mm, 表乾比重=2.65, なお、本実験の場合加熱炉寸法ならびにそれに伴う試験体寸法の制約のために、粗骨材の最大粒径を10mmとした)を用いた。モルタル

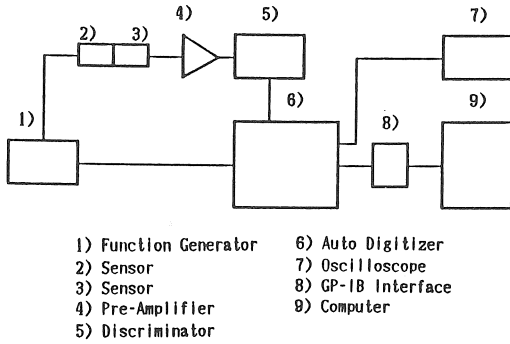
Table I Mix proportions.

Material	W/C (%)	Unit Weight(kg/m ³)				Flow or Slump(cm)
		Water	Cement	Sand	Gravel	
Mortar	50	346	691	1106	--	248
	60	352	587	1174	--	247
	70	357	510	1225	--	260
Concrete	50	200	400	685	1060	11.9
	60	200	333	740	1060	15.2
	70	200	286	779	1060	15.5

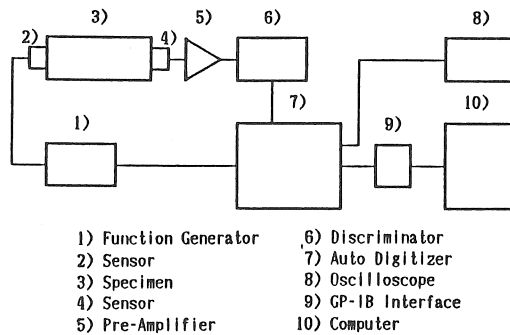
およびコンクリートの調合は、所定のフロー値(コンクリートの場合はスランプ値)が得られるように試し練りによって決めた。標準調合表、フロー値(またはスランプ値)の実測結果を Table I に示す。試験体は、モルタルおよびコンクリートとも 4×4×16cm の横打ち角主体とした。コンクリート試験体は打設上面を打込み直後にこて仕上げし、モルタル試験体は打設後約 6 時間目にストレートエッジを用いて試験体表面を平滑に仕上げた。何れの試験体も材令 1 日目に脱型し、以後試験材令(6 週)まで養生室内(温度: 20±1°C, 湿度: 45±5%)で空中養生を行った。

2・3 計測・処理方法

媒体中を伝播した後、検出用変換子によって検出された超音波パルスには、媒体の材料特性の他に、変換子を含む計測システム自体の特性に関する情報も含まれている。そのため、材料特性の評価に際しては、後述のように、計測システムおよび試験体を含む系における超音波パルスの入・出力関係が近似的には線形系とみなしうる⁷⁾ものと仮定して定式化を行って、これらの計測システムにかかわる情報を除去し、媒体の材料特性に関連する周波数特性のみを抽出して用いた。本研究では、媒体固有の周波数応答特性を表わす指標として、媒体の応答関数(インパルス応答)をフーリエ変換して求まる周波数伝達関数を用いた。使用した計測システムのブロック・ダイアグラムおよび計測機器の各設定感度を、それぞれ Fig. 2 および Table II に示す。なお、アンプの増幅度は、後述の計測種類にかかわらずディスクリミネータが飽和しないように設定した。ファンクション・ジェネレータによって発生させた超音波パルスを発振用変換子を介して試験体に入力し、透過波形を検出用変換子で検出した。この検出波は、



(a) Measuring system including transducer (Type-I).



(b) Measuring system including transducer and medium (Type-II).

Fig. 2 Block diagram of measuring system.

一旦オートデジタイザー（サンプリング間隔および個数：1 μ sec および1024個/1 データ，分解能：12 bit）に記憶させた後，GP-IB インターフェースを介して電子計算機に転送し，波形解析を行った。なお，

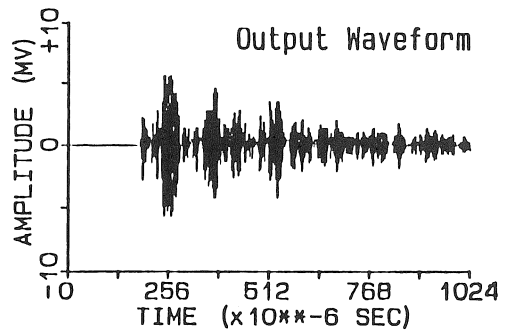
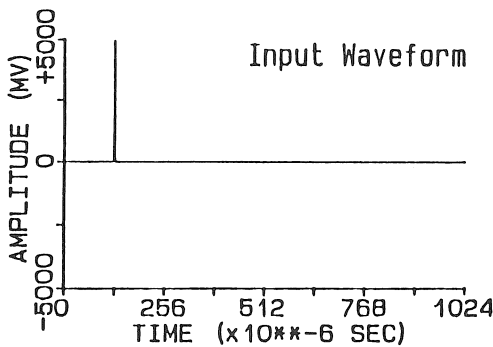


Fig. 3 Example of measured waveform.

(Mortar, W/C : 50%, Heating time : 30min.)

Table II Selected values of measuring apparatus.

Type	Amplification degree (dB)			Frequency range (kHz)	Sampling time (x10 ⁻⁶ s)
	Pre-amp.	Main-amp.	Total		
I (for G _s)	20	0	20	10-300	1
II (for G _s ·G _m)	20	30	50		

入・出力用変換子としては，本解析で対象としている周波数帯域（10～300kHz）で比較的フラットな周波数特性を有することが確認されている⁸⁾AE-905S 変換子（共振周波数：約1 kHz）を用いた。また，各変換子は，熱可塑性樹脂で試験体に直接接着した。計測波形の一例を Fig. 3 に示す。

3. 周波数伝達関数の算定方法

超音波パルスの伝播経路が線形系であるものと仮定すると，入・出力関係は次式で与えられる。

(1) 計測システムのみの場合：

$$Y_s(j\omega) = G_s(j\omega) \cdot X(j\omega) \quad \dots\dots\dots(1)$$

(2) 計測システム+媒体の場合：

$$Y_c(j\omega) = G_s(j\omega) \cdot G_m(j\omega) \cdot X(j\omega) \quad \dots\dots\dots(1')$$

ここに，

$Y_s(j\omega)$ ：計測システムのみで検出された波形のフーリエ変換，

$Y_c(j\omega)$ ：計測システム+媒体の系で検出された波形のフーリエ変換，

$G_s(j\omega)$ ：変換子を含む計測系の周波数伝達関数，

$G_m(j\omega)$ ：媒体の周波数伝達関数，

$X(j\omega)$ ：入力超音波パルスのフーリエ変換。

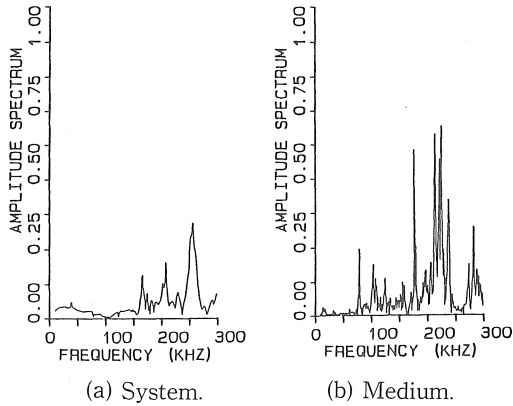
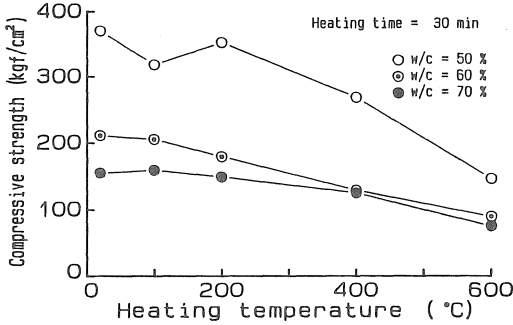
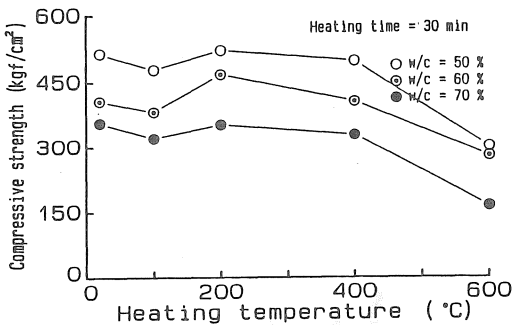


Fig. 4 Example of result of waveform analysis. (Mortar, W/C: 50%, Heating time: 30min.)



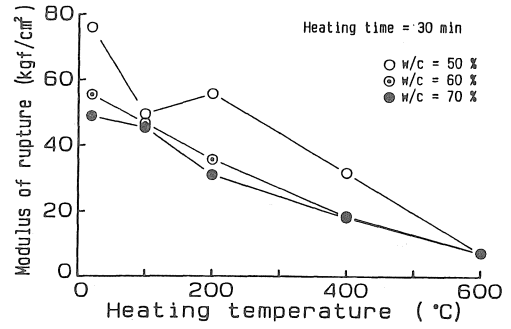
(a) Mortar.



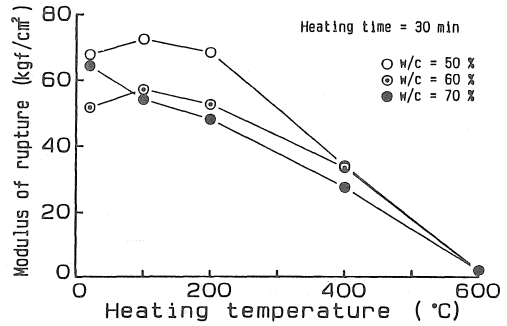
(b) Concrete.

Fig. 5 Relation between compressive strength and heating temperature.

計測システムおよび媒体（モルタルおよびコンクリート）の周波数伝達関数 ($G_s(j\omega)$ および $G_m(j\omega)$) は、それぞれ式(1)および(1)'より次式で与えられる。



(a) Mortar.



(b) Concrete.

Fig. 6 Relation between flexural strength and heating temperature.

(1) 計測システムのみの場合：

$$G_s(j\omega) = Y_s(j\omega) / X(j\omega) \dots\dots\dots(2)$$

(2) 計測システム+媒体の場合：

$$G_m(j\omega) = Y_c(j\omega) / \{G_s(j\omega) \cdot X(j\omega)\} \dots\dots(2)'$$

本実験では、計測システムおよび媒体の周波数伝達関数を算定する際に必要な式(2)および式(2)'中の入力波として、上述のように電気パルスを用いた。なお、入力超音波パルスの幅は、そのフーリエ変換値がなるべくフラットとなるように、小さく設定した方がよいと考えられるが、本実験で入力超音波パルス波の記録に用いたオートデジタイザの性能を考慮して、 $2.5\mu\text{ sec}$ に設定した。また、解析には、計測した1024点のデータを全て用いた。周波数伝達関数に関する処理結果の一例を Fig. 4 に示す。

4. 実験結果とその考察

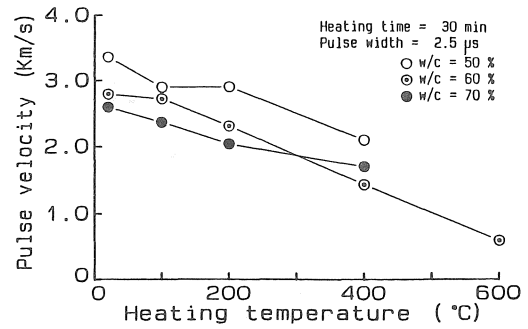
4・1 強度特性

Fig. 5 および Fig. 6 は、それぞれ加熱を受けたモルタルおよびコンクリートの圧縮および曲げ強度と

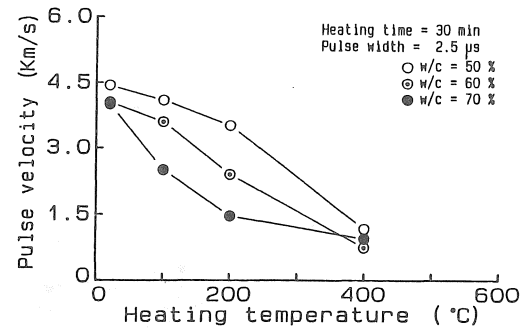
加熱温度との関係を、加熱持続時間が30分の場合について水セメント比(W/C)別に示したものである。図からわかるように、圧縮および曲げ強度は、いずれも加熱温度の上昇とともに低下する傾向を示し、とくに圧縮強度よりも曲げ強度の方が、またコンクリートよりもモルタルの方が加熱温度の影響を顕著に受ける。このように曲げ強度が圧縮強度よりも加熱の影響を顕著に受けたのは、曲げ強度の方が試験体の内部構造の変化により敏感であるためではないかと考えられる。また、コンクリートの方がモルタルよりも加熱温度の影響を受け難いのは、コンクリート中の粗骨材のクラックアレスト効果のために、加熱によって生じた潜在クラックの進展が阻止されるためと考えられる。このようなクラックアレスト効果は、曲げ破壊よりも圧縮破壊において著しいことを示している。ところで、既往の実験結果⁹⁾によれば、加熱温度が200℃以上になると、コンクリートの圧縮強度は急激に低下するという報告もみられるが、本実験結果によれば、Fig. 5(b)から明らかなように、加熱温度が400℃までの範囲のコンクリートは圧縮強度がそれほど低下していない。これは、既往の実験の多くは、H/D (試験体の高さ(H)と最小断面寸法(D)との比) = 2の試験体を用いているが、本実験で用いた圧縮強度試験用の試験体のH/Dは1であるため、H/D = 2の試験体よりも載荷板と試験体端面との摩擦による試験体拘束効果が著しく、加熱によって生じた試験体内部の潜在欠陥の影響を受けにくくなっていたためではないかと考えられる。なお、図には示していないが、加熱による強度低下の割合は、加熱持続時間の長短ならびに試験体の水セメント比の大小には殆ど無関係であった。

4・2 透過超音波の減衰特性

Fig. 7～Fig. 9に、それぞれ透過超音波の各種波形特性値のうち、モルタルおよびコンクリートを透過した超音波の伝播速度、最大振幅およびエネルギーと加熱温度との関係の代表例を示す。透過超音波の各波形特性値は、いずれも加熱温度の上昇とともに減少する傾向を示している。コンクリートの場合、これらの各波形特性値は、水セメント比が大きいほど小さくなっているが、モルタルの場合には、水セメント比の影響はコンクリートの場合のように明確でない。また、伝播速度を除く各波形特性値の絶対値は、モルタルよりもコンクリートの方がかなり小さく(モルタルとコンクリートの測定値の比、伝



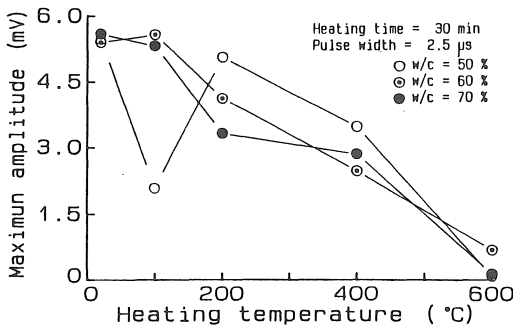
(a) Mortar.



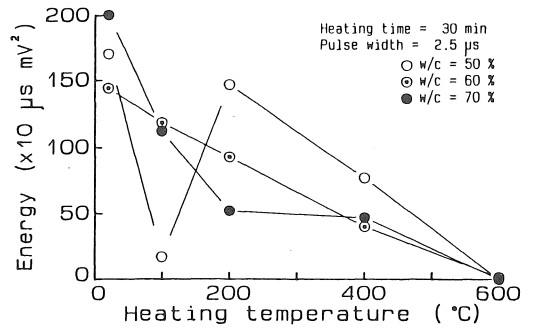
(b) Concrete.

Fig. 7 Relation between pulse velocity and heating temperature.

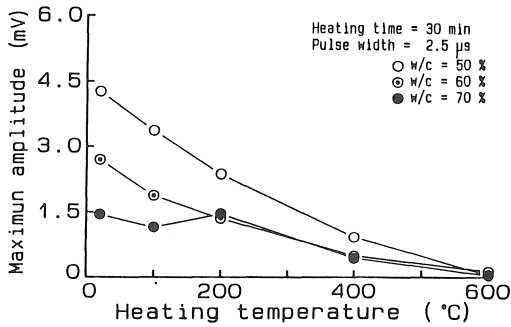
播速度：約1.5倍、最大振幅：約0.6倍、エネルギー：約0.2倍)、コンクリートの方がモルタルよりも超音波の減衰が大きいことがわかる。これは、コンクリートの場合、粗骨材の存在により超音波の反射や散乱などの影響をより大きく受けるためと考えられる。さらに、水セメント比が大きいほど粗骨材と母材モルタルの音響インピーダンスの差も大きくなるため、Fig. 8(b)およびFig. 9(b)に示すように、粗骨材の存在による超音波の減衰は、水セメント比が大きいほど著しい。なお、紙数の関係で図には示していないが、波形の立ち上がりの鋭さを表わす指標とされている検出波形のエネルギー・モーメント¹⁰⁾および波形の集中度を表わす指標とされているエネルギー分散¹⁰⁾は、加熱温度の上昇とともに逆に増大し、徐々に検出波形の立ち上がりは鈍くかつ波形の集中度が分散化する傾向にあることも明らかとなった。また、透過超音波は、別報¹¹⁾で示した実験の結果と同様に、いずれも高周波数成分の減衰が著しいことがわかった。



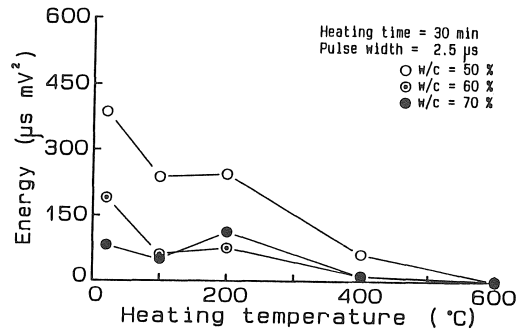
(a) Mortar.



(a) Mortar.



(b) Concrete.



(b) Concrete.

Fig. 8 Relation between maximum amplitude of measured waveform and heating temperature.

Fig. 9 Relation between energy of measured waveform and heating temperature.

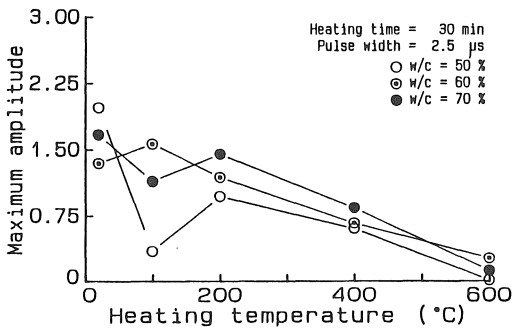


Fig. 10 Relation between maximum amplitude of frequency transfer function and heating temperature (Concrete).

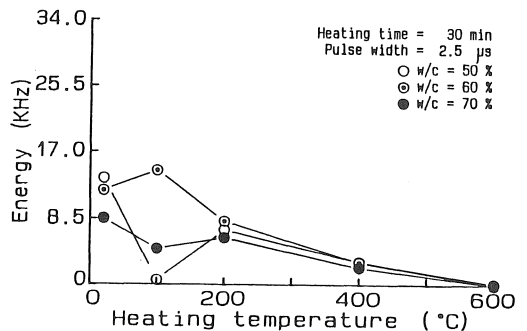


Fig. 11 Relation between energy of frequency transfer function and heating temperature (Concrete).

4・3 周波数応答特性

Fig. 10 および Fig. 11 は、それぞれ加熱を受けたコンクリートの周波数伝達関数の最大振幅および10~300kHzの周波数全域におけるエネルギーと加熱温度との関係を水セメント比別に示したものであ

る。図は、紙数の関係で測定結果の中から代表的なものを選んで示したものである。これらの図によれば、周波数伝達関数の最大振幅ならびにエネルギーは、いずれも加熱温度の上昇とともにほぼ直線的に減少する傾向が認められる。なお、図には示してい

ないが、周波数伝達関数の最大振幅およびエネルギーは、加熱持続時間には殆ど影響を受けないこともわかった。モルタル試験体においても類似の傾向が認められたが、各特性値の絶対値は、コンクリートの場合の2倍～4倍の値を示した。

4・4 劣化度評価

4・4・1 透過超音波の波形特性パラメータを用いる場合

Table IIIは、透過超音波の各種波形特性パラメータ(伝播速度(Vp), 最大振幅(Ampw), エネルギー(Epw), エネルギー・モーメント(Temw)およびエネルギー分散(Edw)とモルタルおよびコンクリートの強度との単相関係数値を一覧にして示したものである。表によれば、モルタルの場合、強度との単相関係数値は伝播速度が最も大きく(曲げ強度: 0.922, 圧縮強度: 0.741), それ以外の特性パラメータは伝播速度に比べてかなり小さな値となっている。コンクリートの場合、強度と超音波伝播速度との単相関係数値は、モルタルの場合よりも小さい(曲げ強度: 0.841, 圧縮強度: 0.279)が、強度と最大振幅およびエネルギーとの単相関係数値は、モルタルの場合に比べて相対的に大きく(曲げ強度: 0.820および0.651, 圧縮強度: 0.662および0.654)となっている。特に、コンクリートの圧縮強度との相関は、最大振幅およびエネルギーの方が伝播速度よりもよいことがわかる。

4・4・2 周波数伝達関数の特性パラメータを用いる場合

Table IVは、超音波スペクトロスコープに関連する周波数伝達関数の各種特性パラメータ(最大振幅(Apmx), 最大振幅時の周波数(Freq), エネルギー(Teng), 50-100kHzおよび200-250kHzの各局所エネルギー(Ep2およびEp5), 50-100kHzおよび200-250kHzの各局所最大振幅(Amp2およびAmp5))とモルタルおよびコンクリートの強度との単相関係数値を一覧にして示したものである。なお、局所エネルギーおよび局所最大振幅は、予備解析の結果に基づいて、比較的相関のよかった帯域の値を採用した。表によれば、モルタルの場合には、50-100kHzおよび200-250kHzの周波数帯域の局所エネルギーおよび局所最大振幅が、一般に最大振幅、最大振幅時の周波数およびエネルギーよりも強度との単相関係数値が大きくなっている。しかし、コンクリートの場合には、最大振幅、最大振幅時の周波数および

Table III Correlation coefficient between strength and characteristics of waveform.

Parameter	Mortar		Concrete	
	Compression	Flexure	Compression	Flexure
<Vp> :Pulse velocity	0.741	0.922	0.278	0.841
<Ampw>:Maximum amplitude	0.426	0.720	0.662	0.820
<Epw>:Energy	0.331	0.585	0.654	0.651
<Temw>:Energy moment	0.201	0.666	0.090	0.776
<Edw>:Energy dispersion	0.116	0.514	0.019	0.744

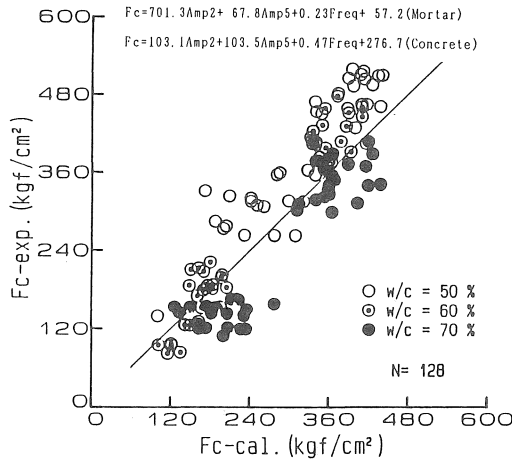
Table IV Correlation coefficient between strength and characteristics of transfer function.

Parameter	Mortar		Concrete	
	Compression	Flexure	Compression	Flexure
<Apmx>:Maxinan amplitude	0.121	0.403	0.621	0.719
<Freq>:Frequency at maxinan amplitude	0.494	0.534	0.625	0.605
<Teng>:Energy(10-300kHz)	0.155	0.293	0.515	0.644
<Ep2>:Energy(50-100kHz)	0.650	0.559	0.309	0.574
<Ep5>:Energy(200-250kHz)	0.548	0.602	0.618	0.596
<Amp2>:Local maximum amplitude(50-100kHz)	0.690	0.608	0.438	0.693
<Amp5>:Local maximum amplitude(200-250kHz)	0.630	0.683	0.637	0.701

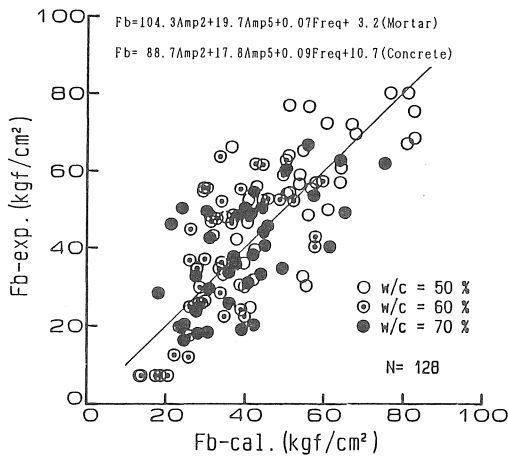
Table V Correlation coefficient between strength and two or three parameters related to frequency transfer function.

Parameter	Mortar		Concrete	
	Compression	Flexure	Compression	Flexure
<Ep2>+<Ep5>	0.741	0.714	0.619	0.688
<Ep2>+<Ep5>+<Freq>	0.770	0.759	0.708	0.766
<Amp2>+<Amp5>	0.768	0.753	0.641	0.782
<Amp2>+<Amp5>+<Freq>	0.784	0.779	0.703	0.817

エネルギーの方が、いずれも強度との単相関係数値が大きくなっている。また、これらの周波数伝達関数特性パラメータを2種類以上併用すると、強度との相関係数は、Table Vに示すようにさらに向上する。例えば、50-100kHzの周波数帯と200-250kHzの周波数帯の局所最大振幅および最大振幅時の周波数を併用すると、圧縮強度との相関係数は、モルタルの場合が0.784、コンクリートの場合が0.703となり、上述の透過超音波の伝播速度を用いた場合よりも向上する。ただし、曲げ強度の場合には、モルタルおよびコンクリートの相関係数は、それぞれ0.779および0.817まで向上するが、超音波パルスの伝播速度を用いた場合(それぞれ0.922および0.841)には及ばない。この点については、今後更に詳細な要因分析



(a) Compressive strength.



(b) Flexural strength.

Fig. 12 Prediction of strength by using three parameters related to frequency transfer function.

を行い、推定精度向上のための方策を探る必要がある。今回の実験の範囲内に関する限り、3種類の周波数伝達関数特性パラメータを用いた場合の加熱を受けたモルタルおよびコンクリートの強度推定結果と実測結果は、Fig. 12のような関係を示した。

以上のことから、周波数伝達関数に関連する特性パラメータのうち、コンクリートの内部構造の変化に敏感なパラメータを用いれば、超音波スペクトロスコーピー法を用いて、加熱による材料内部の劣化度をかなりの精度で推定できる可能性があることがわ

かる。

5. 結論

本研究の結果を要約すると、およそ次のようになる。

- 1) 加熱を受けたモルタルおよびコンクリートの曲げ強度および圧縮強度は、加熱温度の上昇に伴って低下するが、加熱持続時間には殆ど影響を受けない。また、加熱による強度低下率は、圧縮強度よりも曲げ強度の方が、またコンクリートよりもモルタルの方が著しい。
- 2) 加熱を受けたモルタルおよびコンクリートを透過した超音波の伝播速度、最大振幅およびエネルギーは、水セメント比にかかわらず加熱温度の上昇とともに減少するが、検出波形のエネルギー・モーメントおよびエネルギー分散は、逆に増大する。
- 3) 加熱を受けたモルタルおよびコンクリートの周波数伝達関数の振幅およびエネルギーは、加熱温度の上昇とともに減少する。ただし、その減少の割合は、水セメントおよび加熱持続時間にはそれほど影響されない。
- 4) 加熱を受けたモルタルおよびコンクリートの周波数伝達関数において、50-100kHzと200-250kHzの各周波数帯域の局所最大振幅およびエネルギーは、いずれも加熱によって生じる内部構造の変化と密接な関係がある。
- 5) 周波数伝達関数に関連する特性パラメータのうち、コンクリートの内部構造の変化に敏感なパラメータを特定することによって、加熱による材料内部の劣化度をかなりの精度で推定できる。

【謝辞】

本研究の実施に際して有益なる御助言を賜りました名古屋大学小阪義夫教授、並びに実験およびデータ整理に際して御助力を得た土屋宏明君（名古屋大学院生）に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金(奨励研究(A))によったことを付記する。

引用文献

- 1) 日本建築学会：コンクリートの非破壊試験法に関する研究の現状と問題点，(1981)。

- 2) 尼崎省二, 明石外世樹, 高木宣章, 平野博範, セメント技術大会講演要旨, 40, 92 (1986).
- 3) 坂田康徳, 大津政康, コンクリート工学, 24, 7, 135 (1986).
- 4) 松藤泰典, 河上嘉人, 朝日真司, 渡部嗣道, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 465 (1987).
- 5) 山田和夫, 小阪義夫, コンクリート工学年次論文報告集, 9, 449 (1987).
- 6) Brown, A. F., Ultrasonic Testing Edited by J. Szilard, 167 (1982).
- 7) 山田和夫, 土田崇仁, 小阪義夫, セメント技術年報, 41, 281 (1987).
- 8) 丹羽義次, 小林昭一, 大津正康, 奥田和男, 土木学会論文報告集, 314, 137 (1981).
- 9) 嵩秀雄, 大野定俊, コンクリート工学, 22, 13 (1984).
- 10) 山口楠雄, 小柳津宏忠, アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, 6, 94 (1987).
- 11) 山田和夫, 小阪義夫, 材料, 36, 716 (1987).

(受理 平成元年1月25日)