

論文

[1064] 火害を受けたコンクリート中を伝播する超音波の減衰特性に関する研究

正会員 ○ 山田 和夫 (愛知工業大学工学部)

正会員 小阪 義夫 (名古屋大学工学部)

1. まえがき

材料内部の欠陥を超音波を用いて非破壊的に探査する方法としては、既に各種の方法[1]が提案されているが、コンクリートの場合には超音波の減衰が著しいこともあって、その応用は金属など他材料の分野に比べて立ち遅れていた。しかし、最近の電子計測技術の発達に伴って微弱な信号も高感度に検出できるようになったため、コンクリートの分野においても超音波のより高度な利用方法が検討されつつある[2]-[4]。筆者らもコンクリート内部で発生するアコースティック・エミッションの原波形解析手法の確立を目的として、コンクリートの劣化度と周波数応答特性との関係に関する一連の調査研究[5]を行なってきた。本研究はその延長上にある。材料を伝播した超音波の波形には伝播経路に関する各種の情報が包含されているため、検出波形を詳細に解析することによって材料の内部構造の詳細を評価できるのではないかと考えられる。しかしながら、今のところコンクリートの内部損傷度の評価につながる系統的な研究は、殆どみあたらない。そのため、本研究では、コンクリート中を伝播し検出された超音波パルスエコーの周波数成分の減衰特性を計測してコンクリートの損傷度を推定しようとする、いわゆる超音波スペクトロスコーピー[6]によるコンクリートの劣化度診断法の可能性を確かめるための基礎的研究の一つとして、火害を受けたモルタルの劣化度評価に関する一連の検討を行った。

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セメントモルタル試験体を用いて、試験体中を伝播する超音波の諸特性を測定し、それらの特性値とモルタルの劣化度との関係を調査した。本実験で取り上げた要因は、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)ならびに加熱持続時間(30 、 60 および 120 分の3種類)で、超音波パルスの伝播特性の測定ならびにJIS R 5201の規定に準じて強度試験を行った。なお入力超音波パルスの幅は、予備実験の結果を踏まえて $2.5\mu\text{sec}$ に設定した。

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 $=1.2\text{mm}$)を用いた。モルタルの調合は、締固め誤差の影響を極力小さくすることを目的として、材料が分離しない範囲で軟練りとなるように試し練りによって決定した。モルタルの調合表およびフロー値の実測結果を表-1に示す。試験体は、いずれも $4\times 4\times 16\text{cm}$ の横打ち角柱体とし、打設後約6時間目にストレータエッジで試験体表面を平滑にした後、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: $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度: $45\pm 5\%$)で空中養生を行った。なお、試験体は各要因毎に3個製作した。

表-1 モルタルの調合表およびフロー値の実測結果

W/C (%)	標準調合 (kg/m^3)			フロー値
	水	セメント	細骨材	
50	346	691	1106	248
60	352	587	1174	247
70	357	510	1225	260

[註] W/C: 水セメント比。

表-2 計測機器の設定感度

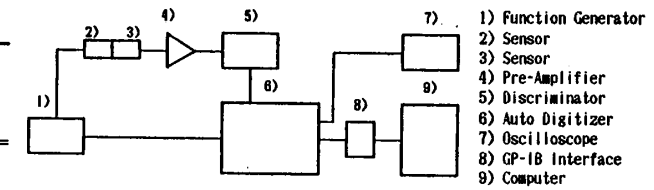
アンプの増幅度(dB)			フィルタ バンド幅 (kHz)	サンプリング 間隔 (μsec)
プリアンプ	メインアンプ	合計		
20	0 ¹⁾	20	10~300	1.0
20	30 ²⁾	50		

〔註〕 1): 変換子を含む計測システムの伝達関数算定、
2): 変換子を含む計測システムと媒体の伝達関数算定。

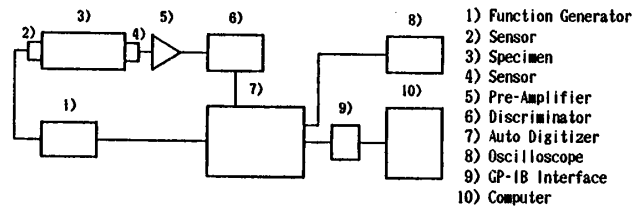
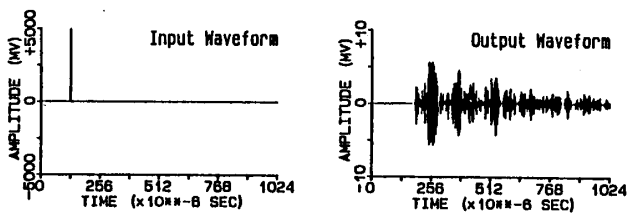
2.3 計測・処理方法

モルタル中を伝播した後、検出用変換子によって検出された超音波パルスエコーは、モルタルの品質のみならず、入力超音波パルスの特性、変換子を含む計測システムの特性な

どの影響も受ける。そのため、計測結果の評価に際してはこれらの計測システムにかかわる影響を除去し、モルタルの特性のみに関連する周波数特性を抽出して用いる必要がある。本研究ではモルタル固有の周波数応答特性を表わす指標として周波数伝達関数を採用した。適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、それぞれ図-1および表-2に示す。実験に際しては、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は発振用変換子を介して試験体に入力し、検出用変換子で検出した。検出した超音波は、一旦オートデジタイザ（サンプリング間隔および個数：1μsecおよび1024個/1データ、分解能：12bit）に記憶させた後、GP-IB インターフェースを介して計算機に転送し、各種の波形処理を行った。なお、入・出力用変換子（AE-905S、共振周波数：約1MHz）は、熱可塑性樹脂で試験体に直接接着した。計測波形の一例を図-2に示す。



(a) 変換子を含む計測システムの周波数伝達関数算定用

(b) 変換子を含む計測システムと媒体の周波数伝達関数算定用
図-1 計測システムのブロック・ダイアグラム図-2 計測波形の一例
(加熱温度：200℃、加熱時間：30分、W/C：50%)

3. モルタルの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。

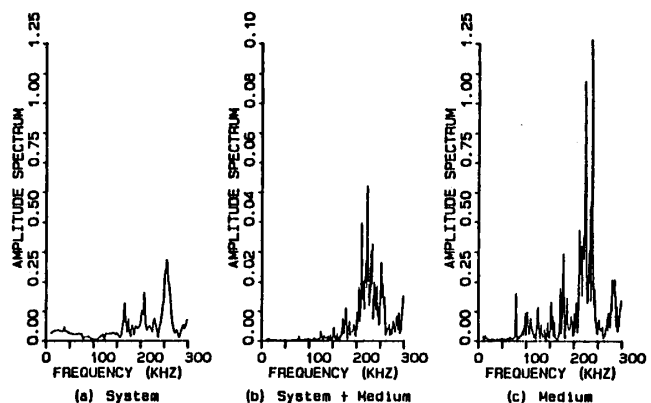
$$Y(j\omega) = G_s(j\omega) \cdot G_m(j\omega) \cdot X(j\omega) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $Y(j\omega)$ ：検出波のフーリエ変換、 $G_s(j\omega)$ ：変換子を含む計測系の周波数伝達関数、 $G_m(j\omega)$ ：モルタルの周波数伝達関数、 $X(j\omega)$ ：入力超音波パルスのフーリエ変換。

モルタルの周波数伝達関数 $G_m(j\omega)$ は、式(1)より次式で与えられる。

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

なお、本実験では、モルタルの周波数伝達関数を算定する際に必要な式(2)中の入力波として、上述のように電気パルスを用いた。周波数伝達関数に関する処理結果の一例を図-3に示す。

図-3 波形処理結果の一例
(加熱温度：200℃、加熱時間：30分、W/C：50%)

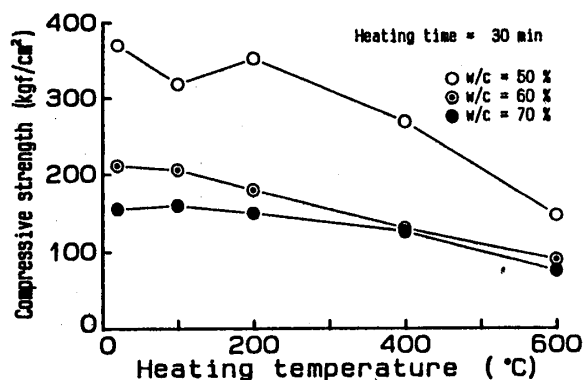


図-4 モルタルの圧縮強度と加熱温度との関係

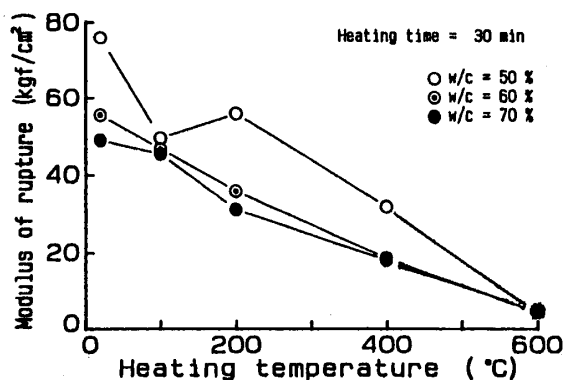


図-5 モルタルの曲げ強度と加熱温度との関係

4. 実験結果とその考察

4.1 加熱を受けたモルタルの強度特性

図-4および図-5は、それぞれ加熱を受けたモルタルの圧縮強度および曲げ強度と加熱温度との関係を水セメント比(W/C)別に示した一例である。図から明らかなように、圧縮強度および曲げ強度は、ともに加熱温度が高くなるほど低下する傾向を示す。特に、モルタルの曲げ強度は、圧縮強度に比べて加熱温度の影響を顕著に受けることがわかる。モルタル内部には、加熱温度の上昇とともに微小ひび割れが発生し、特定温度以上になると結合水が徐々に消失するなど、内部構造が次第に変化していくことが知られている。上述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、曲げ強度の方が内部構造の変化により敏感に影響されるためであるものと考えられる。なお、本実験の範囲では、モルタル強度の加熱温度による低下の割合と加熱持続時間およびモルタル試験体の水セメント比の大小との間には、それほど明確な相関は認められなかった。

4.2 加熱を受けたモルタル中を伝播した超音波の減衰特性

図-6～図-8は、加熱を受けたモルタル中を伝播し検出された超音波パルスエコーの各種波形特性パラメーターの値と加熱温度との関係を示した例である。これらの図によれば、伝播速度、最大振幅およびエネルギーは、いずれも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傾向を示すことがわかる。ただし、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である検出波形のエネルギー・モ

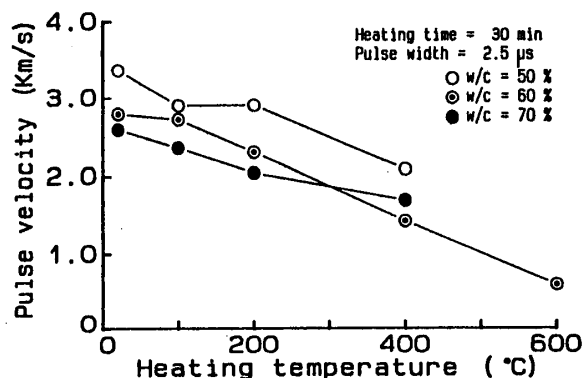


図-6 超音波パルスの伝播速度と加熱温度との関係

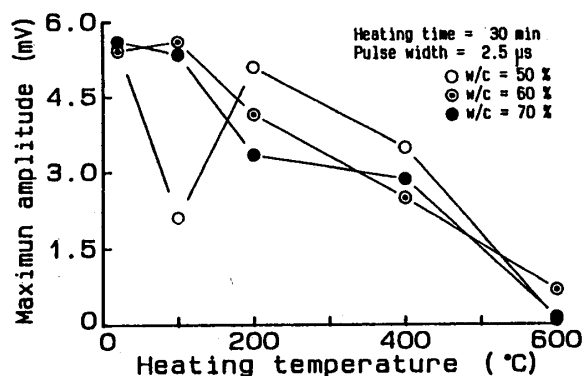


図-7 検出波形の最大振幅と加熱温度との関係

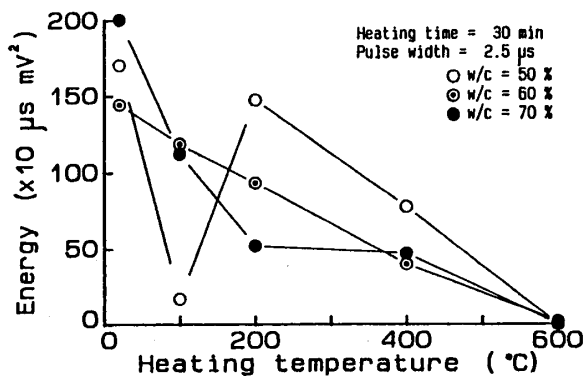


図-8 検出波形のエネルギーと加熱温度との関係

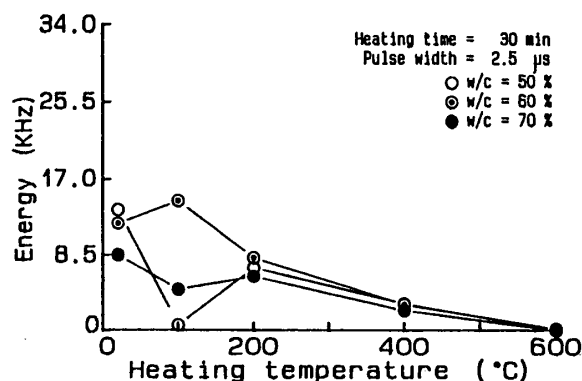
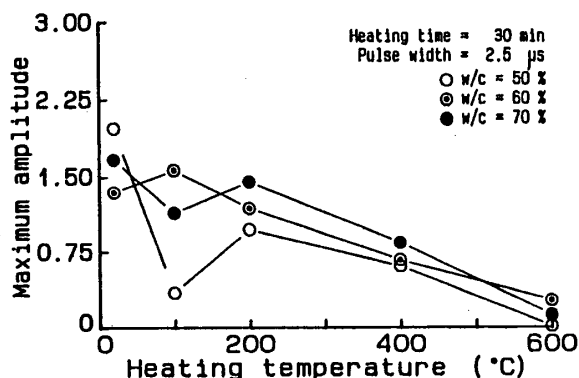


図-9 周波数伝達関数の最大振幅と加熱温度との関係 図-10 周波数伝達関数のエネルギーと加熱温度との関係

メント[7] および波形の集中度を表わす指標であるエネルギー分散[7] は逆に増大し、加熱温度の上昇とともに、徐々に波形の立ち上がりが鈍くかつ波形の集中度が分散化する傾向にあることが明かとなった。また、初動振幅は、加熱温度には殆ど影響を受けなかった。

4.3 加熱を受けたモルタルの周波数応答特性

図-9および図-10は、加熱を受けたモルタルの周波数伝達関数の最大振幅および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例である。なお、周波数伝達関数は、式(2)によって算定した。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減少する傾向が認められるが、水セメント比の影響は明確ではない。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がわかった。

4.4 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評価の可能性

検出された超音波パルスエコーの特性パラメータのうちで伝播速度を用いる方法（以下、音速法と略記する）は、コンクリートの強度推定のための超音波非破壊試験方法として、既に実用化されている。ここでは、火害を受けたモルタル試験体の非破壊的強度推定を音速法と超音波スペクトロスコピー法とを用いて行い、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評価への可能性について検討する。

実測結果に基づき、超音波伝播速度とモルタルの圧縮および曲げ強度との関係を直線式で表わせば、それぞれ次のようになる。

$$f_c = 89.37 V_p + 5.3 \quad C R = 0.741, \quad f_b = 22.67 V_p - 12.7 \quad C R = 0.922$$

ここに、 f_c 、 f_b ：それぞれ圧縮強度および曲げ強度 (kgf/cm²)、

V_p ：伝播速度 (km/sec)、 $C R$ ：相関係数。

伝播速度以外の検出波形特性パラメータのうち、モルタル強度との相関がよいものは、検出波形の最大振幅 ($C R = 0.426$ (圧縮強度)、 $C R = 0.720$ (曲げ強度)) であるが、上記の伝播速度と比べると相関係数 $C R$ 値は、かなり小さな値となっている。これに対して、超音波スペクトロスコピーに関連する周波数伝達関数の各種特性パラメータのうち、モルタル強度との相関が比較的良好なパラメータは、50～100kHzの範囲の局所最大振幅 ($C R = 0.690$ (圧縮強度)、 $C R = 0.608$ (曲げ強度)) およびエネルギー ($C R = 0.650$ (圧縮強度)、 $C R = 0.559$ (曲げ強度)) と200～250kHzの範囲の局所最大振幅 ($C R = 0.630$ (圧縮強度)、 $C R = 0.683$ (曲げ強度)) およびエネルギー ($C R = 0.548$ (圧縮強度)、 $C R = 0.602$ (曲げ強度)) であった。これらの周波数伝達関数特性パラメータを2種類併用すると、モルタル強度との関係式および相関係数は、次のようになる。

$$f_c = 1069.0 E_p^{0.2} + 13.6 E_p^{0.5} + 125.7 \quad CR = 0.741, \quad f_b = 180.3 E_p^{0.2} + 3.7 E_p^{0.5} + 19.9 \quad CR = 0.714$$

$$f_c = 754.0 a_{mp}^{0.2} + 80.9 a_{mp}^{0.5} + 93.0 \quad CR = 0.768, \quad f_b = 118.9 a_{mp}^{0.2} + 23.3 a_{mp}^{0.5} + 13.2 \quad CR = 0.753$$

ここに、 $E_p^{0.2}$ 、 $E_p^{0.5}$ ：それぞれ50～100kHzおよび200～250kHzの範囲のエネルギー、

$a_{mp}^{0.2}$ 、 $a_{mp}^{0.5}$ ：それぞれ50～100kHzおよび200～250kHzの範囲の局所最大振幅。

周波数伝達関数の特性パラメータを1種類のみを用いた場合に比べて、相関係数はかなり向上

することができる。例
えば、圧縮
強度の場合
には、50～
100kHzの周
波数帯と20
0～250kHz
の周波数帯
のエネルギ
ーおよび局
所最大振幅
を併用する
と、相関係
数は、それ
ぞれ0.741
および0.768
となり、火
害を受けた
モルタルの
圧縮強度と
の相関は、
上述の超音
波パルスの
伝播速度を
用いた場合
(相関係数
= 0.741)
よりも向上
する。た
だし、曲
げ強度の場
合には、50
～100kHzの

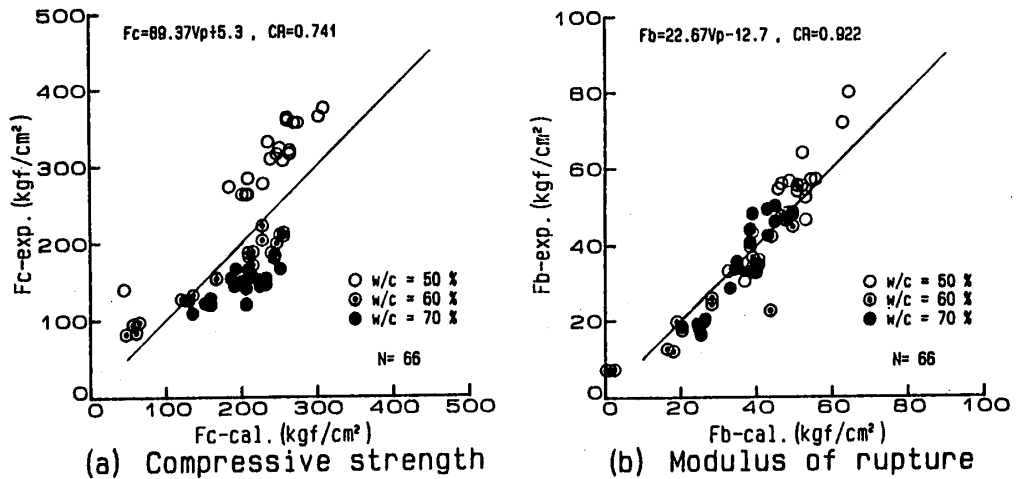


図-11 超音波パルスの伝播速度を用いた場合のモルタル強度の推定結果

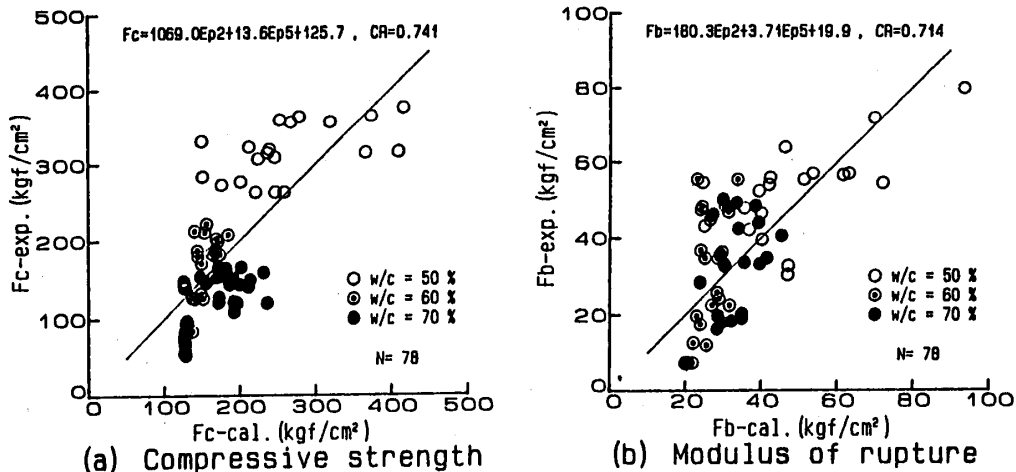


図-12 周波数伝達関数のエネルギーを用いた場合のモルタル強度の推定結果

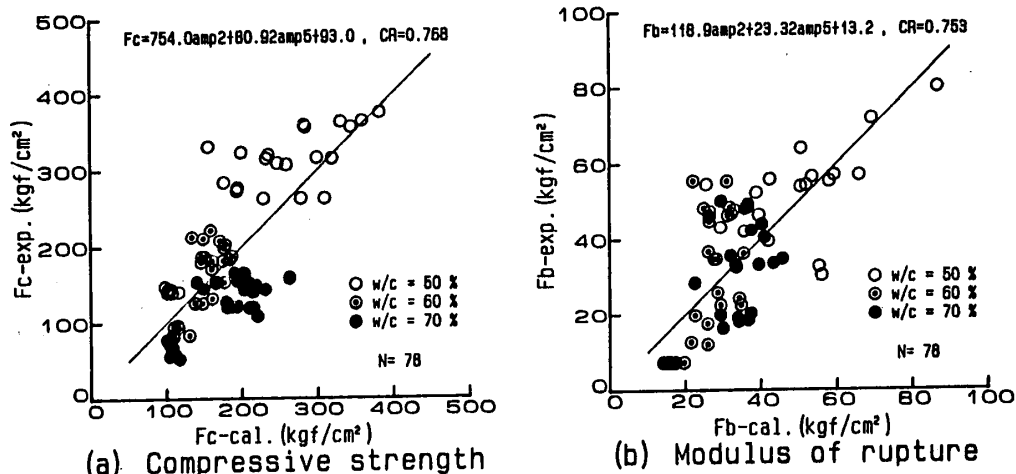


図-13 周波数伝達関数の局所最大振幅を用いた場合のモルタル強度の推定結果

周波数帯と200～250kHzの周波数帯のエネルギーおよび局所最大振幅を併用すると、相関係数は、それぞれ0.714および0.753まで向上するが、超音波パルスの伝播速度を用いた場合（相関係数＝0.922）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を行い、推定精度向上のための方策を探る必要がある。超音波パルスの伝播速度および2種類の周波数伝達関数特性パラメータを用いた場合の火害を受けたモルタルの強度推定結果と実測結果との比較例を図-11～図-13に示す。

5. 結 論

本研究では、超音波スペクトロスコピーを適用したコンクリートの劣化度診断方法の確立を目的とした研究の第一歩として、まず、火害を受けたモルタルを取り上げて一連の基礎的検討を行った。本研究によって得られた結果は、およそ次のようになる。

- 1) 火害を受けたモルタルの曲げ強度および圧縮強度は、加熱温度の上昇および水セメント比の増大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、加熱によるモルタル強度の低下率は、圧縮強度よりも曲げ強度の方が著しい。
- 2) 火害を受けたモルタル中を伝播し検出され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、逆に増大する傾向を示す。ただし、検出波形の初動振幅は、殆ど加熱温度の影響を受けない。
- 3) 火害を受けたモルタル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、水セメント比および加熱持続時間にはそれほど影響されない。
- 4) 火害を受けたモルタル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モルタルの内部構造の変化と密接な関係がある。したがって、これらの特性パラメータを用いれば、超音波スペクトロスコピー法を用いてコンクリートの劣化度をかなりの精度で推定できる可能性がある。

【謝 辞】

実験およびデータ整理に際して御助力を得た神谷徳之君および宇田川孝経君（愛知工業大学学部学生）に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は、昭和62年度文部省科学研究費補助金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、123pp.
- [2] 尼崎省二、明石外世樹、高木宣章、平野博範：超音波スペクトル解析によるコンクリートの品質評価について、第40回セメント技術大会講演要旨、1986、pp.92-93.
- [3] 坂田康徳、大津政康：弾性波フィルター特性によるコンクリートのひび割れ評価法に関する基礎研究、コンクリート工学、Vol.24、No.7、1986、pp.135-145.
- [4] 松藤泰典、河上嘉人、朝日真司、渡部嗣道：超音波横波法によるコンクリートの凝結性状評価法に関する研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp.465-468.
- [5] 山田和夫、小阪義夫：コンクリート内部で発生したアコースティック・エミッションの伝播特性、第9回コンクリート工学年次論文報告集、1987、pp.499-504.
- [6] Sachse, W.: Ultrasonic Spectroscopy of a Fluid-filled Cavity in an Elastic Solid, Jour. of Acoust. Soc. Am., Vol.56, No.3, 1974, pp.891-896.
- [7] 山口楠雄、小柳津宏忠：AE情報分散処理による適応型多目的監視システム、第6回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集、1987、pp.94-99.