

超音波スペクトロスコピー法を適用した
コンクリートの劣化度評価に関する研究
(その1：高応力繰返し荷重を受けたコンクリートの場合)

山田和夫

**Damage Evaluation
of Concrete by Ultrasonic Spectroscopy
(Part-1 : Concrete subjected to High Stress Cyclic Loading)**

Kazuo YAMADA

The waveform of ultrasonic pulses through concrete contains various informations related to the internal structure of concrete. It may be possible to clarify the internal structure of concrete by analyzing the measured waves in detail. Thus, an ultrasonic spectroscopy is useful to evaluate the quality of concrete by measuring the frequency characteristics of ultrasonic pulse through concrete. The ultrasonic spectroscopy technique was applied to evaluating the quality of concrete damaged by the cyclic loading, as the fundamental investigation to establish a new non-destructive testing technique for concrete.

The ultrasonic pulse velocity, energy and maximum amplitude of the measured waveform decreased, but the energy moment and energy dispersion increased with the progress of accumulative damage of concrete subjected to the cyclic loading.

The frequency components higher than 150 kHz gradually diminished, and those lower than 150 kHz of the frequency transfer function became prominent significantly with the progress of damage of concrete during the cyclic loading.

1. まえがき

最近、アルカリ骨材反応や塩害などによるコンクリート構造物の早期劣化が社会的な問題となっており、関連する各省庁や学・協会においても、それらの原因の解明並びに実構造物に対する劣化度診断方法の確立に関する多方面からの調査・研究が勢力的に行われている。筆者らも、従来からこのような社会的背景を踏まえて、コンクリート中を伝播し検出された超音波の周波数特性に注目したコンクリートの劣化度診断方法、いわゆる超音波スペクトロスコピー法¹⁾による劣化度診断方法の確立を目的として、一連の理論的および実験的研究²⁾⁻⁹⁾を行ってきた

が、本報は、その延長上の研究で、繰返し外力を受けたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性とコンクリートの劣化度との関連について実験的に検討を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 実験の概要

各種繰返し外力を受けた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、それらの特性値とコンクリートの劣化度との関係を調査した。取り上げた実験の要因は、水セメント比 ($W/C = 50, 60$ および 70% の3種類) およ

表-1 調査表およびスランプの実測結果

W/C (%)	Unit Weight(kg/m ³)				Slump (cm)
	Water	Cement	Sand	Gravel	
50	200	400	685	1060	11.9
60	200	333	740	1060	15.2
70	200	286	779	1060	15.5

[Note] W/C: Water cement ratio by weight.

び加力方法（漸増ひずみ繰返し載荷、定荷重繰返し載荷および定ひずみ繰返し載荷の3種類）である。なお、漸増ひずみ繰返し載荷に際しては、ひずみ増分(Δε)を200μ、定ひずみ繰返し載荷に際しては、上限設定ひずみレベル(ε_u)を1軸圧縮強度(f_c)の1.0、0.9および0.8の応力レベルに対応する3種類のひずみ度、定荷重繰返し載荷に際しては、上限設定応力レベル(σ_u)を1軸圧縮強度の0.9、0.85および0.8の3種類とした。また、下限設定応力レベルは、いずれの繰返し載荷の場合も零とした。

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（最大寸法=5mm、表乾比重=2.60）および川砂利（最大寸法=15mm、表乾比重=2.65）を使用した。コンクリートの調査表は、設計スランプを15cmとして試し練りによって決定した。コンクリートの調査表を表-1に示す。試験体は、いずれも10×10×10cmの立方体とし、打設後24時間目に脱型し、その後試験時まで養生室（温度=20±1℃、相対湿度=85±5

%)内で空中養生を行った。試験材令は、約3ヶ月である。

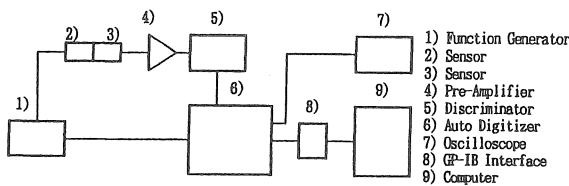
2.3 計測・処理方法

本実験では、超音波の計測は、各繰返し載荷における上限および下限設定応力点で行った。使用した計測システムのブロック・ダイアグラムを図-1に示す。計測手順は次のようである。まず、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（パルス幅=2.5μsec）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。次に、この検出波を一旦オートデジタイザー（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電子計算機に転送し、波形解析を行った。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両端に直接接着した。本研究では、既報⁴⁾と同様に、計測システムの特性に依存しない媒体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用いた。また、検出された波形の各種特性を調べるために、山口・小柳津¹⁰⁾がアコースティック・エミッション(AE)のリアルタイム処理に際して用いた図-2に示すような各種波形特性パラメータを使用した。

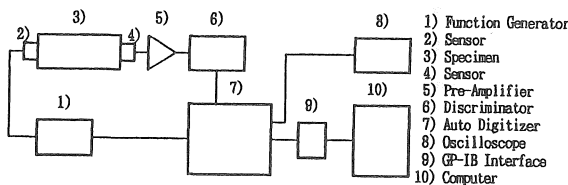
3. 実験結果とその考察

3.1 検出波形の減衰特性

(1) 漸増ひずみ繰返し載荷時

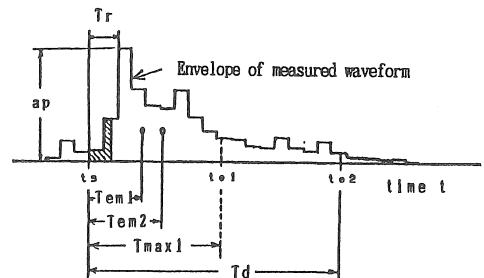


(a) 変換子を含む計測システムの周波数伝達関数算定用



(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



- ① Start time (Ts),
- ② Rising time (Tr)
- ③ Duration time (Td),
- ④ Rising amplitude (AMP_{ris})
- ⑤ Maximum amplitude (AMP_{max}),
- ⑥ Average amplitude (AMP_{ave})
- ⑦ Energy (E_t),
- ⑧ Energy moment (Tem)

$$E_t = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \Delta t$$

$$T_{em} = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T_i \cdot \Delta t / E_t$$

- ⑨ Energy dispersion (E_d),
 - ⑩ Zero-crossing number (N_z)
- $$E_d = \sum_{i=0}^n a_i \cdot T_i^2 \cdot \Delta t / E_t \cdot (T_{em})^2$$

⑪ Number of over flow.

図-2 検出超音波の波形特性パラメータ[10]

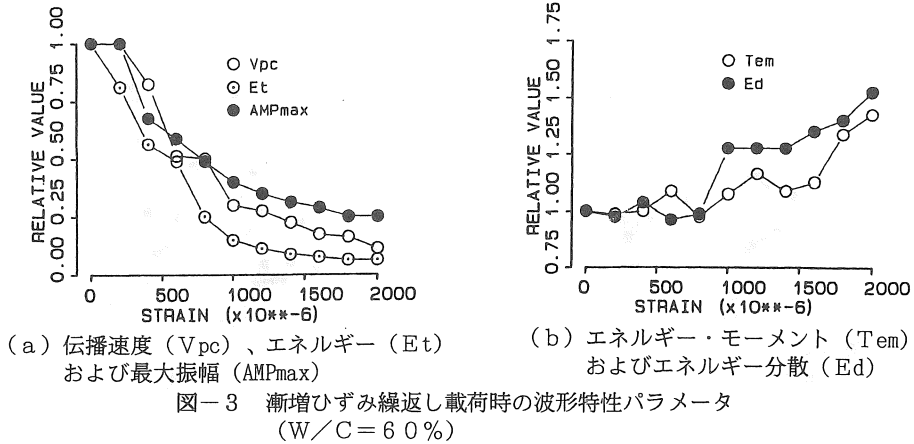
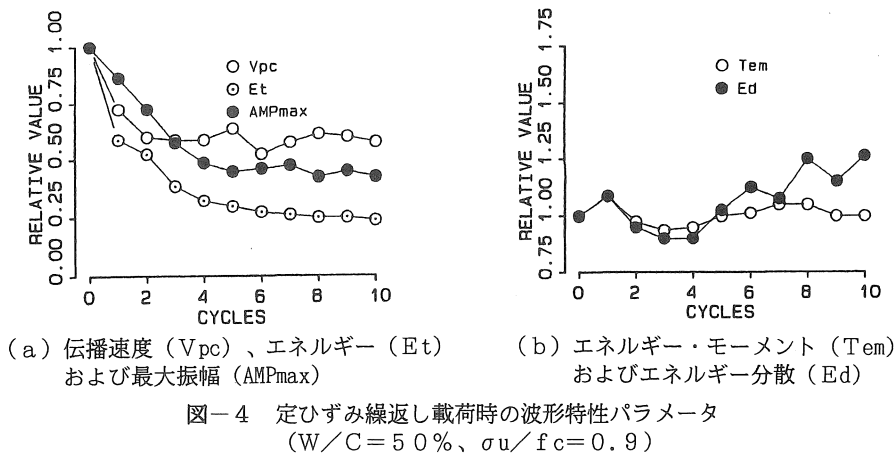


図-3 (a) および (b) は、それぞれ透過超音波の各種波形特性パラメータ(図-2参照)のうち、コンクリート中を透過した超音波の伝播速度 (V_{pc} = l/T_s 、ここに l :伝播距離)、エネルギー (E_t)、および最大振幅 (AMP_{max})、並びにエネルギー・モーメント (T_{em}) および エネルギー分散 (E_d) と繰返し上限ひずみ度との関係の水セメント比(W/C)が60%のコンクリートに対して示したものである。ただし、図の縦軸は、いずれも無载荷時の値で除して無次元化してある。これらの図によれば、上限ひずみ度が增大して試験体の劣化が進行すると、伝播速度 (V_{pc})、エネルギー (E_t) および最大振幅 (AMP_{max}) は減少するが、波形の立下りの鋭さを表すエネルギー・モーメント (T_{em}) および波形の集中度を表すエネルギー分散 (E_d) は 逆に増加する傾向を示し、検出波形の立下りが鈍く、かつ波形の集

中度も分散化する傾向にあるといえる。また、上記のパラメータのうち、E_tおよびE_dが試験体の内部構造の変化に対して敏感に反応することがわかる。

(2) 定ひずみ繰返し载荷時

図-4 (a) および (b) は、上限設定ひずみ度を応力度がコンクリート強度に対して 0.9 の場合のひずみ度に設定したときの透過超音波の各種波形特性パラメータ値と繰返し回数との関係を、W/C = 50%のコンクリートの結果に対して、前掲の図-3と同様の方法で整理したものである。図によれば、各パラメータ値の変化状況と繰返し回数との関係は、前掲の図-3 とほぼ同様の傾向を示すが、いずれのパラメータ値も、繰返し回数の増加とともにある特定の値に収束する傾向にあることがわかる。これは、定ひずみ繰返しの場合、繰返し回数が増加しても試験体は不安定場には移行せず、上限設定ひ



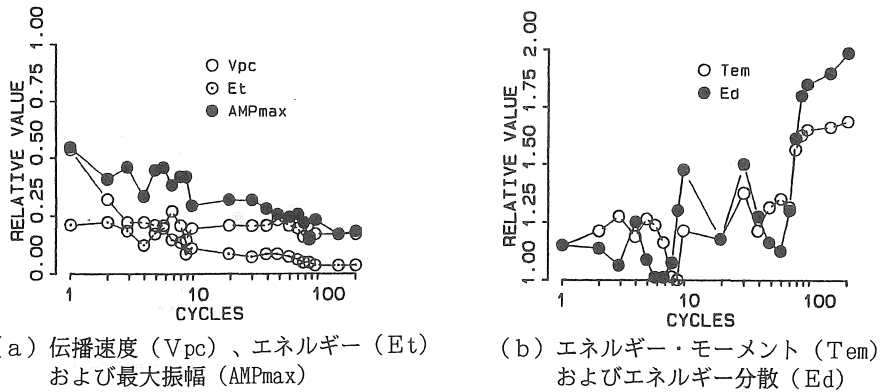


図-5 定荷重繰返し载荷時の波形特性パラメータ
($W/C=70\%$ 、 $\sigma_u/f_c=0.8$)

ずみレベルに応じた特定の安定場に落ち着くためと考えられる。なお、前掲の図-3 (a) の場合には、検出波形の最大振幅 (AMP_{max}) よりも超音波の伝播速度 (V_{pc}) の方が試験体の劣化に伴う低下が著しかったが、図-4 (a) によれば、逆に AMP_{max} の方が V_{pc} よりも試験体の内部構造の変化の影響を顕著に受けている。図には示していないが、一般に試験体の劣化度が小さく、 V_{pc} の低下が比較的小さい場合には、 V_{pc} よりも AMP_{max} の方が試験体の内構造の変化に敏感なようである。

(3) 定荷重繰返し载荷時

図-5 (a) および (b) は、上限設定応力度をコンクリート強度の 0.8 ($=\sigma_u/f_c$) に設定した場合の透過超音波の各種波形特性パラメータ値と繰返し回数との関係を、 $W/C=70\%$ のコンクリートの結果に対して、前掲の図-4 と同様の方法で整理したものである。この試験体は、本実験で規定した上限繰返し回数の 200 回でもまだ破壊に至っていないが、検出波形のエネルギー・モーメント (T_{em}) およびエネルギー分散 (E_d) は、 80 回の繰返し近傍から急激に増大する傾向を示しており、破壊が間近に迫っていることをうかがわせる。なお、図によれば、最初の数回の繰返し後は各パラメータ値の変動が大きく明確な傾向を示さない区間が認められるが、これは、おそらくコンクリートのひずみ硬化現象のためではないかと考えられる。ところで、前掲の図-4 (a) と図-5 (a) とを比較すると、 1 サイクル目の V_{pc} 、 E_t および AMP_{max} の値は、図-4 (a) に示した $\sigma_u/f_c=0.9$ ($W/C=50\%$) の場合の結果よりも図-5 (a) に示した $\sigma_u/f_c=$

0.8 ($W/C=70\%$) の方がかなり小さくなっているが、これは、おそらく $W/C=70\%$ のコンクリートでは、試験体内部の力学的非均質性が $W/C=50\%$ のコンクリートよりも著しいため、 $\sigma_u/f_c=0.8$ の場合でも試験体内部には微小ひび割れが、 $W/C=50\%$ で $\sigma_u/f_c=0.8$ のコンクリートの場合よりも、数多く発生しているためではないかと思われる。

3.2 試験体の周波数応答特性の減衰特性

(1) 漸増ひずみ繰返し载荷時

表-2 は、 $W/C=60\%$ のコンクリートの漸増ひずみ繰返し载荷時に計測した波形を用いて算定した周波数伝達関数のエネルギー (E_t 、本研究では、 $\int |G_m(j\omega)|^2 df$ を周波数伝達関数のエネルギーと定義した。ただし、 $G_m(j\omega)$ は試験体の周波数伝達関数を、 $\int df$ は周波数領域での積分を意味する) を、 50kHz の周波数帯域毎に分類して示したものである。ただし、表中の値は、無载荷時の値で除して無次元化してある。この表によれば、無载荷時には、 $50\sim 100\text{kHz}$ 、 $200\sim 250\text{kHz}$ および $250\sim 300\text{kHz}$ の周波数成分 (表中の () 内の値) が全エネルギーのそれぞれ約 31% 、約 27% および約 26% を占め、 $10\sim 50\text{kHz}$ および $150\sim 200\text{kHz}$ の周波数帯 (周波数成分は全体のそれぞれ約 2.5% および約 1.7%) を除けば、比較的フラットな特性を示しているが、ひずみレベルの増加とともに、 $250\sim 300\text{kHz}$ の周波数成分が著しく減衰し、逆に $10\sim 50\text{kHz}$ および $50\sim 100\text{kHz}$ の周波数成分が著しく増大し、全体として低周波数成分の卓越した周波数特性を示すようになることがわかる。た

表-2 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の
相対エネルギー成分
(漸増ひずみ繰返し載荷時、 $W/C = 60\%$)

Top strain ($\times 10^{-6}$)	Change of energy component for each 50kHz frequency range					
	10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
0	1.00 (0.025)	1.00 (0.314)	1.00 (0.118)	1.00 (0.017)	1.00 (0.270)	1.00 (0.256)
200	0.60	0.81	1.59	1.41	1.30	0.64
400	0.68	1.03	1.28	0.59	1.12	0.76
600	0.76	0.89	0.86	0.59	1.29	0.97
800	2.24	0.92	0.96	0.94	0.98	1.01
1000	2.80	0.92	1.58	1.36	0.91	0.77
1200	3.00	1.61	1.73	0.59	0.48	0.34
1400	3.12	1.89	1.50	0.88	0.65	0.46
1600	3.52	1.51	1.48	0.41	0.58	0.27
1800	4.12	1.38	1.04	0.47	0.68	0.56
2000	4.40	1.19	1.12	0.53	0.82	0.69
2200	4.88	1.56	1.25	0.82	0.63	0.29
2400	5.52	1.77	0.50	0.70	0.76	0.34
2600	6.32	1.51	0.53	0.76	0.70	0.37
2800	6.60	1.05	0.35	0.94	0.97	0.33
3000	5.68	1.47	0.78	1.06	0.84	0.35
3200	5.24	1.37	0.64	1.18	0.95	0.41
3400	6.80	1.27	0.48	1.36	0.73	0.45
3600	5.00 (0.125)	1.79 (0.563)	0.53 (0.063)	1.47 (0.025)	0.46 (0.125)	0.25 (0.063)

[Note] Value in (): Relative energy component.

表-3 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の
相対エネルギー成分
(定ひずみ繰返し載荷時、 $W/C = 50\%$ 、
 $\sigma_u/f_c = 0.9$)

Cycles	Change of energy component for each 50kHz frequency range					
	10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
0	1.00 (0.003)	1.00 (0.083)	1.00 (0.127)	1.00 (0.130)	1.00 (0.237)	1.00 (0.436)
1	2.67	1.33	2.37	1.76	0.66	0.45
2	3.33	1.08	1.98	1.48	0.87	0.42
3	6.33	1.31	2.02	1.78	0.83	0.43
4	5.67	1.12	2.03	2.25	0.55	0.48
5	7.67	1.55	1.96	2.56	0.51	0.33
6	4.67	1.07	1.90	1.73	0.48	0.73
7	5.00	0.95	2.12	1.72	0.43	0.74
8	4.00	1.35	2.54	2.24	0.38	0.37
9	3.33	1.43	2.84	1.48	0.35	0.54
10	4.00 (0.012)	1.21 (0.100)	2.35 (0.298)	1.41 (0.183)	0.38 (0.090)	0.73 (0.317)

[Note] Value in (): Relative energy component.

だし、150~200 kHzの周波数成分は、内部構造の変化に対して比較的鈍感である。

(2) 定ひずみ繰返し載荷時

表-3は、 $W/C = 50\%$ のコンクリートの定ひずみ繰返し載荷時(ただし、 $\sigma_u/f_c = 0.9$ の場合)の周波数伝達関数のエネルギー成分の変化状況を表

と同等の方法で整理したものである。この場合には、前述のように試験体は不安定場には移行しないため、各周波数帯におけるエネルギー成分の繰返し回数による変化は、上述の漸増ひずみ繰返し載荷時の場合ほど著しくはないが、それでも繰返し回数の増加とともに、200~250kHzの周波数成分が減少

表-4 50kHz毎の周波数帯域における周波数伝達関数の相対エネルギー成分
(定荷重繰返し载荷時、 $W/C = 70\%$ 、 $\sigma_u/f_c = 0.8$)

Cycles	Change of energy component for each 50kHz frequency range					
	10~50	50~100	100~150	150~200	200~250	250~300
0	1.00 (0.070)	1.00 (0.019)	1.00 (0.268)	1.00 (0.088)	1.00 (0.661)	1.00 (0.026)
1	1.86	1.11	1.33	0.65	0.89	0.62
2	1.71	0.73	1.10	1.04	0.92	0.31
3	1.14	0.74	1.45	0.64	0.86	0.23
4	0.71	0.63	0.68	0.56	1.18	0.19
5	0.86	0.79	0.89	0.76	1.07	0.50
6	1.57	1.37	1.40	1.04	0.82	0.73
7	1.29	1.89	1.50	0.88	0.77	0.50
8	1.57	1.95	2.03	1.16	0.56	0.42
9	2.29	2.79	1.62	0.96	0.69	0.62
10	2.43	2.95	1.97	1.12	0.54	0.42
20	1.71	3.05	0.86	0.96	1.05	0.31
30	2.86	3.16	1.77	1.04	0.62	0.19
40	2.29	2.53	1.16	0.84	0.89	0.42
50	3.57	4.84	2.16	0.89	0.41	0.31
60	6.14	3.95	1.63	0.60	0.58	0.42
70	6.00	4.84	1.09	0.66	0.77	0.31
80	7.38	5.05	0.95	0.73	0.72	0.62
90	6.71	3.47	0.53	0.43	1.05	0.35
100	8.14	3.00	0.76	0.65	0.93	0.88
150	8.07	4.21	1.14	0.75	0.66	0.62
200	11.77 (0.824)	5.37 (0.102)	1.52 (0.407)	0.86 (0.076)	0.38 (0.254)	0.38 (0.010)

[Note] Value in (): Relative energy component.

(約24%から約9%へ変化) するのに対して、100~150kHzの周波数成分が増加(約13%から約30%へ変化)し、若干ではあるが低周波数成分の卓越した周波数特性へと移行している。なお、これら以外の周波数帯における周波数成分の繰返し回数に伴う変化は極めて小さいが、全体的には、10~200kHzの周波数成分は増加し、200~300 kHzの周波数成分は減少する傾向を示していることがわかる。

(3) 定荷重繰返し载荷時

表-4は、 $W/C = 70\%$ のコンクリートの定荷重繰返し载荷時(ただし、 $\sigma_u/f_c = 0.8$ の場合)の周波数伝達関数のエネルギー成分の変化状況を表-2と同様の方法で整理したものである。この表によれば、理由は現在のところ明かではないが、無载荷時には、100~150kHz および200~250kHzの周波数成分が卓越しており、この2帯域の周波数成分が全体の約93%を占めるといふ、前述の漸増ひずみ繰返しおよび定ひずみ繰返し载荷の場合とはかなり異なった周波数特性となっている。そして、繰返し回数の増加とともに、150kHz以上の周波数成分が減衰す

るのに対して、逆に150kHz以下の周波数成分が増大し、最終的には10~50kHzの極めて低周波数の成分が卓越した周波数特性を示すようになることがわかる。ただし、150~200kHzの周波数成分は、漸増ひずみ繰返しの場合と同様に、内部構造の変化に対して比較的鈍感である。

4. 結論

本研究では、超音波スペクトロスコピー法を適用したコンクリートの劣化度評価方法の確立を目的とした基礎的研究の一つとして、各種繰返し荷重を受けたコンクリートを取り上げて一連の検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようになる。

1) 繰返し外力に伴ってコンクリートの劣化が進行すると、検出波形特性パラメータのうち、一般に超音波の伝播速度、エネルギーおよび最大振幅は減少するが、エネルギー・モーメントおよびエネルギー分散は増加する。特に、検出波形のエネルギーは、従来からコンクリートの劣化

度評価に用いられている伝播速度よりも、コンクリートの内部構造の変化に敏感に反応する。

- 2) 繰返し外力に伴ってコンクリートの劣化が進行すると、コンクリートの周波数応答特性は、一般に150kHz以上の周波数成分は減衰するのに対して、150kHz以下の周波数成分は増大し、徐々に低周波数成分の卓越した特性へと移行する。ただし、本実験の範囲では、150~200kHzの周波数成分は、コンクリートの内部構造の変化に対して比較的鈍感であった。

[謝 辞]

本研究の実施に際して有益なるご助言を賜りました名古屋大学小阪義夫教授、ならびに実験およびデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学生の上田直樹君、服部光助君、水野久樹君および山本正岳君に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は、平成元年度文部省科学研究費補助金（一般研究(B)）、ならびに内藤科学技術振興財団および石田財団の研究助成金によったことを付記し、謝意を表する。

[参考文献]

- 1) Brown, A.F. : Ultrasonic Spectroscopy, Ultrasonic Testing, pp.167-215, 1982.
- 2) 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、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第1号、pp.499-504,1987.
- 3) 山田和夫、小阪義夫：コンクリート中を伝ばするアコースティック・エミッションの減衰特性、材料、第36巻、第406号、pp.716-722, 1987.
- 4) 山田和夫、小阪義夫：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、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、pp.361-366, 1988.
- 5) 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：コンクリートの伝達関数に及ぼす各種要因の影響、セメント技術年報、第42巻、pp.259-262, 1988.
- 6) 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：超音波スペクトロスコピーによる火災を受けたコンクリートの劣化度評価、日本建築学会東海支部研究報告集、第27号、pp.37-40, 1989.
- 7) 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：コンクリートの超音波波動伝播特性に関する解析的検討、第43回セメント技術大会講演集、第43巻、pp.320-325, 1989.
- 8) 山田和夫、小阪義夫：極低温下に曝されたコンクリート中を伝播した超音波の減衰特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、第1号、pp.331-336, 1989.
- 9) 山田和夫、土屋宏明、小阪義夫：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に関する基礎的研究—高温加熱を受けたコンクリートの場合—、材料、第38巻、第431号、pp.959-965, 1989.
- 10) 山口楠雄、小柳津宏忠：A E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、pp.94-99, 1987.

(受理 平成2年3月20日)