

## 論文

## [1103] コンクリートの共振周波数・超音波伝播速度と弾性係数及び強度との関係について

川上英男\*1・脇敬一\*2・今井重行\*3

## 1. まえがき

コンクリートの非破壊試験としてはいくつかの方法が挙げられているが、ここではそのうち超音波速度法と共振法を取り上げた。コンクリートの非破壊試験は、主として圧縮強度の推定を目的とするだけにこれらの非破壊試験結果と圧縮強度の関係について多くの研究成果が報告され、例えば文献1, 2は、それらを要領よくまとめたものとして参考に値する。ところで超音波伝播速度も共振周波数もコンクリートの比重や弾性性質を計測対象とするものであって、圧縮強度との間に物理的因果関係があるとは云えず、単に経験的事実を取り上げているものである。コンクリートの初期弾性係数 ( $E_0$ ) あるいは圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数 ( $E_c$ ) といった弾性指標に対して、それでは超音波伝播速度 ( $V$ )・共振周波数 ( $f$ ) はその圧縮強度 ( $F_c$ ) との対応よりもより忠実な指標となり得るものであろうか? 本報告はこの様な観点から超音波伝播速度や共振周波数を計測したコンクリート供試体の圧縮試験を行い、それによって得られた  $E_0$ ,  $E_c$  及び  $F_c$  との相関係数を比較検討するものである。

本論文で取り上げた検討対象は砕石コンクリート(粗骨材の粒径別に4種, 水セメント比3種)及び川砂利コンクリート(粗骨材の岩種別5種, 水セメント5種)で、供試体は計108本である。

## 2. 使用材料, 調合, 混練, 養生

使用材料を表1に、調合を表2に示す。川砂, 川砂利とも表乾状態で用いた。川砂利は一粒づつ5種類の岩種別に選分けた。また、それらを10~15, 15~20, 20~25mmの粒径にふるい分けそれぞれ1:2:2の比で混合したものを用いた。砕石は10~15, 15~20, 20~25mmの単一

表 - 1 使用材料

		表乾比重	吸水率(%)	弾性係数( $10^5 \text{kgf/cm}^2$ )	
細骨材	九頭龍川産 川砂 (2.5mm以下)	2.58	2.08	—	
粗骨材	花崗岩	2.71	0.54	4.73 - 6.52	
	ひん岩	2.76	0.33	6.22 - 7.12	
	九頭龍川産川砂利 砂岩	2.80	0.30	8.84 - 9.27	
	流紋岩	2.55	1.66	2.04 - 3.41	
	安山岩	2.89	0.90	4.70 - 6.98	
	河野村桜橋産砕石 (25mm以下)	2.71	0.90	4.99 - 6.33	
	(15mm以下)	2.69	1.41		
セメント:普通ポルトランドセメント		比重:3.16			
	実験1	実験2	実験3	実験4	
	曲げ強度( $\text{kgf/cm}^2$ )	72.9	64.4	81.9	80.1
	圧縮強度( $\text{kgf/cm}^2$ )	389	375	370	411

\*1 福井大学教授 工学部環境設計工学科, 工博 (正会員)

\*2 福井大学技官 工学部環境設計工学科

\*3 福井大学学生 工学部環境設計工学科

粒径でそれぞれ用いた場合とそれらを等量ずつ混合した場合の4種である。岩石の弾性係数は玉石より採取した5cmφ×10cmの円柱試験体の圧縮試験より求めたものである。先ずアイリッヒ型ミキサーでモルタルを練り、湿布で覆って50分間静置し、再度練り直してから1本分のモルタルと粗骨材に手練りを加えて型枠に打ち込んだ。供試体は10cmφ×20cm円柱体である。翌日キャッピング、翌々日脱型、以後材令4週まで水中標準養生を行った。

表 - 2 調合表

	粗骨材	W/C		絶対容積(1/m <sup>3</sup> )		
		(%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント	細骨材	粗骨材
調合1	碎石 (実験1)	55	166	95	277	451
	川砂利 (実験2)	43	169	125	245	451
		35	174	157	208	451
調合2	川砂利 (実験3)	30	177	186	176	451
	(実験4)	26	180	218	141	451

### 3. 試験方法

供試体の質量・比重を測定した後、共振周波数と超音波伝播時間(対称法)を計測した。その後、供試体の両側面に抵抗線ゲージを貼り付け、圧縮試験を行った。測定方法、機器等は次の通りである。

- a) 共振周波数：(株)M社製ヤング率測定機(MIN-1101-3型)により、縦振動による共振周波数を測定し動弾性係数 $E_d$ を(1)式によって算定した。

$$E_d = 0.00408 (L/A) \cdot W f^2 \quad (1)$$

$f$ ：共振周波数(c/s),  $E_d$ ：動弾性係数(kgf/cm<sup>2</sup>)

$L$ ：試験体長さ(cm),  $W$ ：質量(kg),  $A$ ：断面積(cm<sup>2</sup>)

- b) 超音波伝播時間：T工業(株)製UVM5型を用いた。測定用周波数は50KHzである。伝播速度は(2)式によって算定した。

$$V = (L/T) \cdot 10 \quad (2)$$

$V$ ：伝播速度(km/s),  $L$ ：測定距離(cm),  $T$ ：伝播時間(μs)

- c) コンクリート歪度：ポリエステル歪ゲージの検長は60mmである。

応力度・歪度関係を3次式(3)で表わし、これより初期弾性係数( $E_0$ )、割線弾性係数( $E_c$ )の値を求めた。

$$\sigma = A + B \cdot \epsilon + C \cdot \epsilon^2 + D \cdot \epsilon^3 \quad (3)$$

$A, B, C, D$ ：係数,  $\sigma$ ：応力度(kgf/cm<sup>2</sup>),  $\epsilon$ ：歪度

#### 4. 砕石コンクリートの実験結果と考察

超音波伝播速度 (V) と初期弾性係数 (Eo) , 割線弾性係数 (Ec) , 圧縮強度 (Fc) の関係を図1 (a,b,c)に一括して示す。また共振周波数から(1)式によって求めた動弾性係数 (Ed) とEo, Ec, Fcとの関係についても同様にまとめたのが図2 (a,b,c)である。それぞれの関係式を実験データから求め、その相関係数と共に表3に示す。なお、砕石の粒径種別による差は明瞭でないので全体を一括して取り扱った。

表3に示すように、超音波伝播速度については、相関係数はFcとの関係において最も大きくEoとの関係において最も小さい。共振周波数より求めた動弾性係数についても同様である。

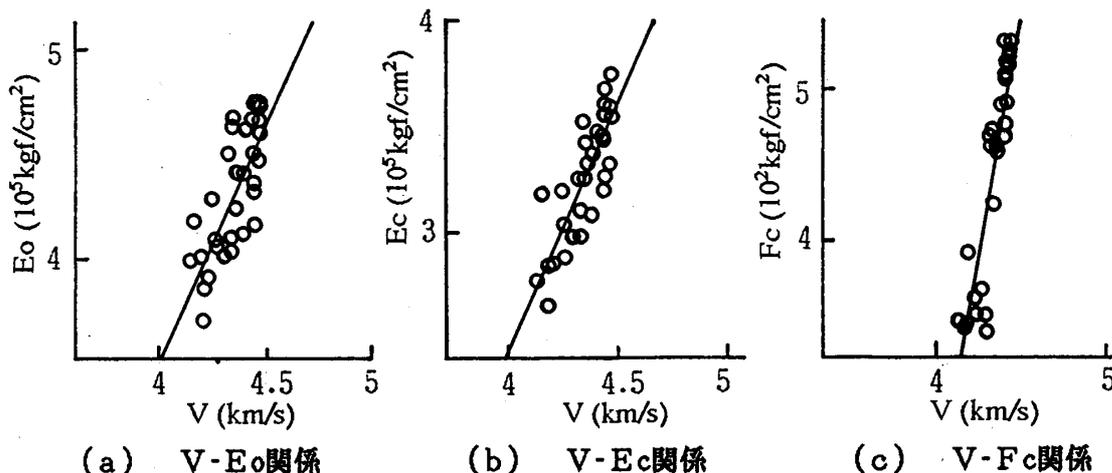


図 - 1 砕石コンクリートの超音波伝播速度 (V) の相関関係

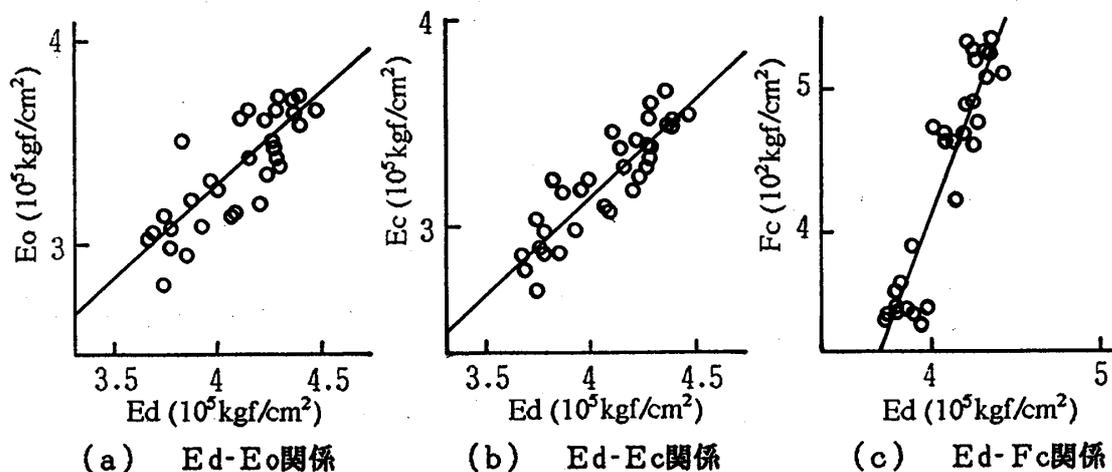


図 - 2 砕石コンクリートの動弾性係数 (Ed) の相関関係

表 - 3 砕石コンクリート (実験1) の実験結果

非破壊試験項目	関係式	相関係数
超音波伝播速度 (V)	$E_o = 2.118V - 5.825$	0.7671
	$E_c = 2.236V - 6.478$	0.8301
	$F_c = 688.0V - 2544.3$	0.9034
共振周波数より求めた動弾性係数 (Ed)	$E_o = 1.018E_d - 0.807$	0.8233
	$E_c = 1.068E_d - 1.154$	0.8913
	$F_c = 313.4E_d - 842.1$	0.9253

5. 川砂利コンクリートの実験結果と考察

表2の調査に示すように粗骨材含有量は一定である。水セメント比が30%と26%の場合はコンクリートの充填性を考えて母材モルタル中の砂含有量を大幅に減らした。そこで実験結果も表2の調査1と調査2に分けて整理した。

5.1 調査1 (W/C=55,43,35%) の場合

粗骨材の各岩種ごとのVとE<sub>o</sub>, E<sub>c</sub>, F<sub>c</sub>との関係を図3-図5に示す。それぞれの関係式を1次式で表した場合の相関係数は表4に示す通りである。資料数が少ないので確実性は高くはないと云え、全般的に相関係数はF<sub>c</sub>において最も高く、ついでE<sub>c</sub>, E<sub>o</sub>の順のように見受けられる。しかしながら、これらのF<sub>c</sub>との関係は粗骨材岩種相互間ではかなり異なっている。圧縮強度はコンクリートの破壊のタイプによって大きく影響を受け、それは骨材の強度や母材モルタルとの弾性係数比、あるいはモルタルとの付着強度に依存する(たとえば文献3)ことによるものと考えられる。

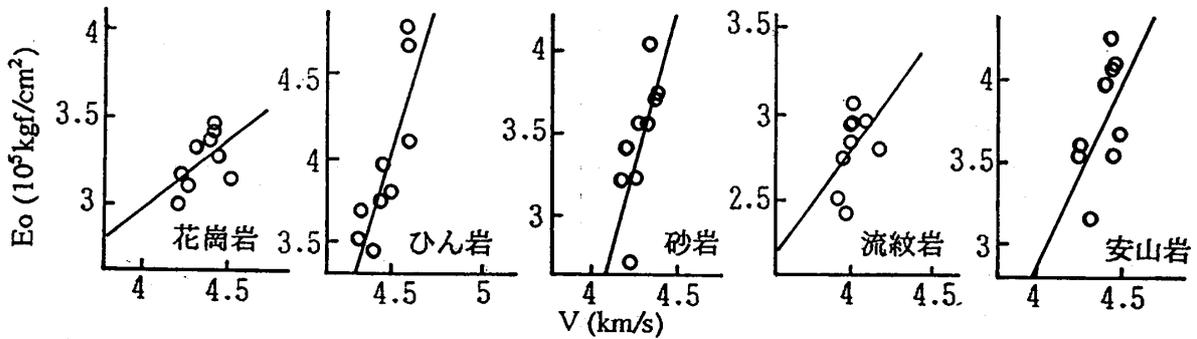


図 - 3 粗骨材岩種別・超音波伝播速度 (V) とE<sub>o</sub>の関係

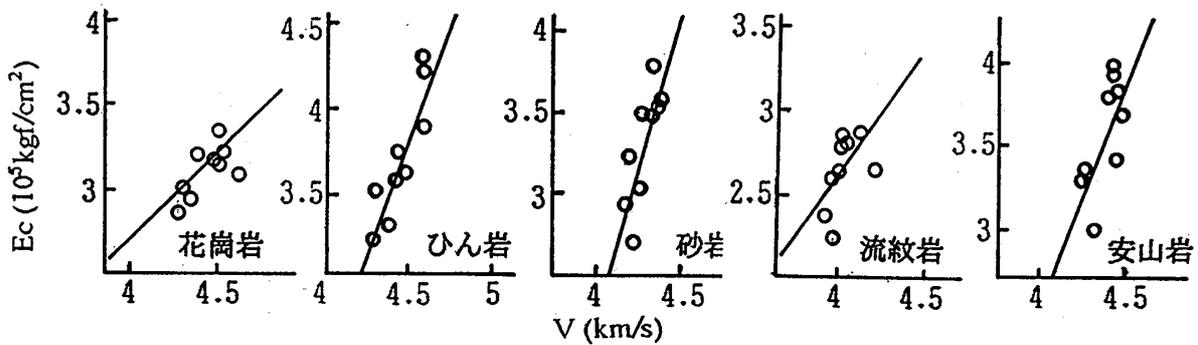


図 - 4 粗骨材岩種別・超音波伝播速度 (V) とE<sub>c</sub>の関係

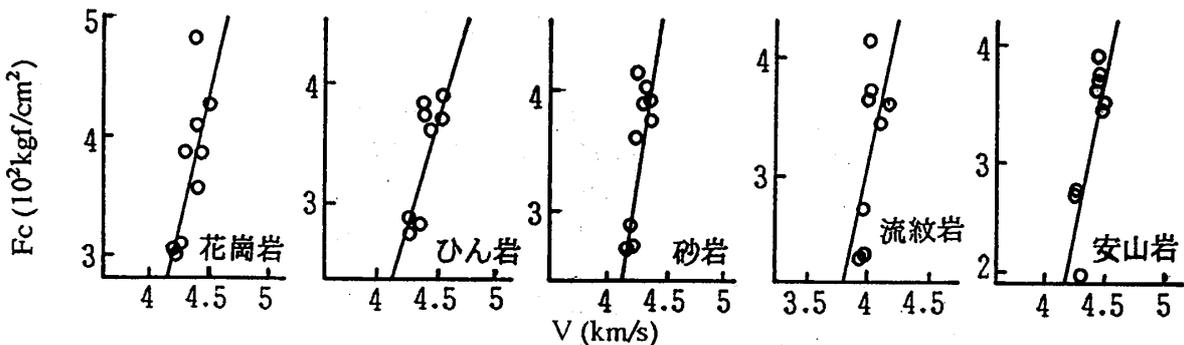


図 - 5 粗骨材岩種別・超音波伝播速度 (V) とF<sub>c</sub>の関係

次に岩種を問わずこれらを総合した場合を図6, 図7に示す。またそれらの相関係数を表5に示す。

岩種が異なる粗骨材のコンクリートを一括した場合であっても、VまたはEdとEoやEcとの間には可成り高い相関関係が認められる。粗骨材の弾性係数が複合材料としてのコンクリートの弾性性質に直接寄与するためと考えられる。一方、圧縮強度Fcとの相関はきわめて低いものとなる。前述のようにコンクリートの破壊のタイプにより圧縮強度は粗骨材の弾性係数以外の因子の影響を受けるためと考えられる。圧縮強度の推定に非破壊試験を用いる場合には、圧縮強度とVまたはEdとの関係は粗骨材岩種によって異なることに注意する必要がある。

表 - 4 川砂利コンクリートの実験結果 (相関係数)

粗骨材	花崗岩	ひん岩	砂岩	流紋岩	安山岩
V-Eo	.5206	.8299	.7419	.4590	.5770
V-Ec	.6695	.8781	.8108	.5180	.7192
V-Fc	.7537	.8148	.8162	.5532	.7965

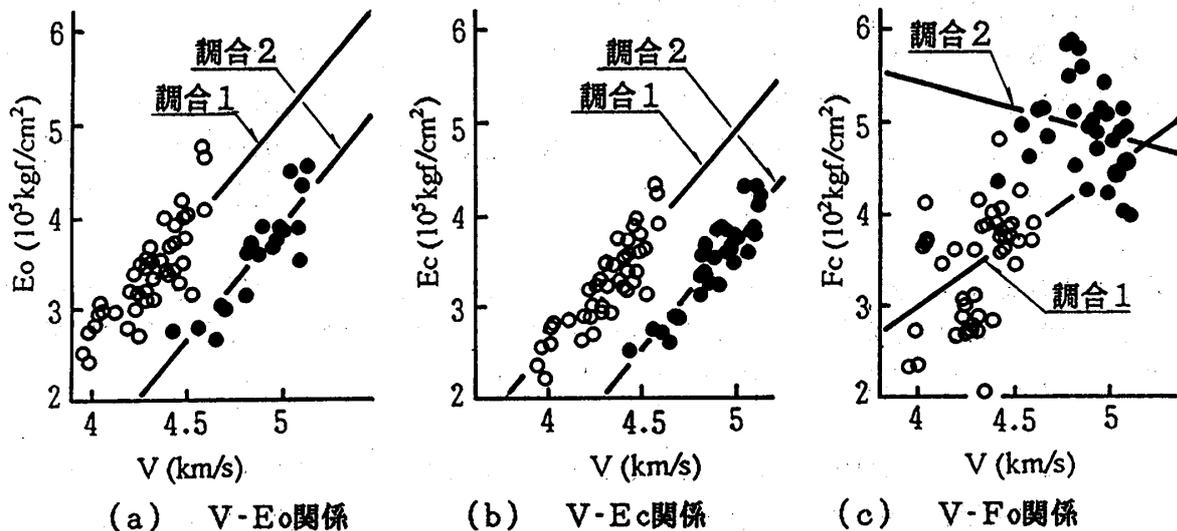


図 - 6 川砂利コンクリートの超音波伝播速度 (V) の相関関係

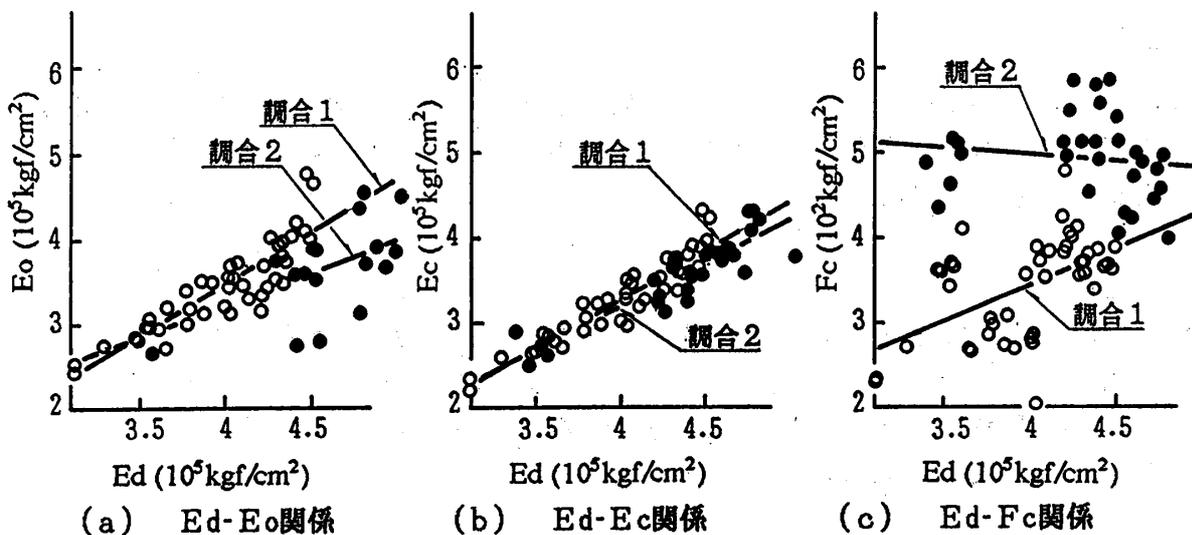


図 - 7 川砂利コンクリートの動弾性係数 (Ed) の相関関係

表 - 5 川砂利コンクリートの各相関関係

	調合 1 (w/c=55, 43, 35%)			調合 2 (w/c=30, 26%)		
	Eo	Ec	Fc	Eo	Ec	Fc
V	.8241	.8711	.4414	.8844	.9097	.2066
Ed	.8751	.9233	.5414	.6471	.9143	.1356

### 5. 2 調合 2 (w/c=30%, 26%) の場合

実験結果を上記同様に図 6 - 図 7 と表 5 にまとめた。相関係数は V と Ed 共に、Eo と Ec に対して大きく、Fc に対して小さいという状況は調合 1 の場合と同様である。

### 6. むすび

材令 4 週・湿潤状態のコンクリートに対して計測した超音波伝播速度及び共振周波数と、同一試験体の圧縮試験によって得られた初期弾性係数、強度の 1/3 の応力度における割線係数ならびに圧縮強度との相関関係を検討した結果、実験に供した粗骨材の岩種 6 種（碎石 1 種、川砂利 5 種）のコンクリートにおいて次の点が明かとなった。

- 1) 骨材の岩種と含有率が同じコンクリートにあっては、超音波伝播速度及び共振周波数より算定した動弾性係数と初期弾性係数・割線係数及び圧縮強度との間に相関性が認められる。それぞれの 2 者間の相関係数は圧縮強度において最も高く、次いで割線弾性係数、そして初期弾性係数の順である。（相関係数が圧縮強度に対して最も大きくなる理由の解明は今後の課題である。）
- 2) 5 種類の岩質の川砂利コンクリートの結果を集計した場合には、超音波伝播速度・共振周波数より算定した動弾性係数と、初期弾性係数及び割線弾性係数との間にはそれぞれ相関性が認められる。一方、圧縮強度との間には明瞭な相関性は認められなくなる。

以上からコンクリートの弾性性質については、粗骨材岩種を一括して取り扱っても超音波伝播速度や共振周波数といった非破壊試験からの推定が可能であることが示された。一方、コンクリートの圧縮強度に対しては骨材岩種を区別して取り扱うことが重要であることが示された。

### 謝辞

本報告はコンクリートの物性に関する実験的研究のうち非破壊試験関係をまとめたものである。実験全般には福井大学学生、大田圭信、川崎竜治、及び小松雄一の諸君が参加している。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 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) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 丸善 1983
- 3) 川上英男: 骨材種類がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp.63-68, 1991