

フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究

— モルタルの弾性波伝播特性について —

西林 新蔵*・木山 英郎*・阪田 憲次**・井上 正一*

(1976年5月31日受理)

Fundamental Studies on the Rheological Properties of Fresh Concrete
—The Propagation Characteristics of the Elastic Wave in Mortar—

By Shinzo NISHIBAYASHI*, Hideo KIYAMA*, Kenji SAKATA** and Shoichi INOUE*

(Received, 31 st of May, 1976)

Such characteristics of fresh concrete as workability, consistency, placeability, finishability, pumpability etc. belong to complex qualities which can not be measured directly. In order to evaluate quantitatively the characteristics of fresh concrete, it is necessary to seek the help of the knowledge of rheology which is the field of science dealing with the deformation and the flow of material.

A series of studies have been projected to clarify the feasibility of applying rheology to evaluate the characteristics of fresh concrete. They included the examinations on the results obtained by means of the rotational viscometer and the tri-axial compressive test device, and on the propagation properties of dynamic wave.

The present paper describes the design of an apparatus for measuring the propagation of elastic wave in fresh paste and mortar, and the experimental investigation on rheological characteristics of fresh paste and mortar obtained with this apparatus.

1 ま え が き

フレッシュコンクリートの性質は、一般にワーカビリティという術語で総称されている。しかし、この術語に含まれている意味は極めて広義にわたり、さらに施工現場における諸条件や実際にコンクリートを取り扱う作業員の経験的要素もかなり含まれているので、ワーカビリティそのものの定義は依然として曖昧のままに残されている。このワーカビリティには、コンクリートの可動性、すなわち流動と変形に対する抵抗性、締固め性およ

び分離の傾向の三つの異なる性質が含まれている。現在までに提唱されてきたワーカビリティを判定するための諸試験法は、ワーカビリティの中のある限られた性質のみを捕えたもので、ワーカビリティ全体を正しく評価するものとはいえない。

最近、コンクリート用材料として碎石、砕砂、人工軽量骨材の使用や、空気連行性や減水性を目的とした界面活性剤の使用の機会が多くなり、さらにコンクリートの打設に新しい施工方法（ポンプ工法）が導入され、フレ

* 土木工学科 Department of Civil Engineering

** 岡山大学 Okayama University

フレッシュコンクリートの物性をより適確に把握しようとする気運が盛んになってきた。

このような背景のもとで、フレッシュコンクリートの物性を学問的かつ実際に発展させるためには、フレッシュコンクリートの性質をより科学的な手段でもって定量的に評価することが必要不可欠であると考えられる。この手段の一つに、フレッシュコンクリートの流動と変形の性質に注目したいいわゆるレオロジー的考察が考えられる。

当材料研究室においては、上述したような観点にたつて、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する研究プロジェクトを設定して1970年から実験を開始し、その間に得られた成果を公表してきた。

まず、フレッシュコンクリートの性質をレオロジー的に把握するためのアプローチについて文献1)で総論的に述べ、つぎに、フレッシュコンクリートにある外力を与えた場合の可動性は、粘性と降伏値を持つ一種のビンガム流動を呈するとの仮定のもとに、試作した回転粘度計を用いて行なったペースト、モルタルの粘性と降伏値をレオロジー量として考察した研究結果を文献2)~6)で述べた。三軸圧縮試験における静的変形に着目し、フレッシュコンクリートの内部摩擦角と粘着力(凝集力)を求めて、これをレオロジー量として考察した結果を文献7), 8)で、さらにフレッシュコンクリートに応力波を与えた場合の伝播特性から動的な変形や流動の性質を求め、これをレオロジー量として考察した結果を文献9)~11)で発表した。

本研究は、フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する研究プロジェクトの一環として行なったもので、とくにその動的特性を取り扱っている。すなわち、打撃式の弾性波伝播測定器を試作しその性能を評価するとともに、この装置を用いてペーストおよびモルタル中に伝播する縦波の伝播速度および減衰定数を測定し、こ

れらの測定値からフレッシュコンクリートの動的弾性率やその粘性率を求めて、これらのレオロジー特性値に対して若干の考察を加えたものである。

2 応力波伝播の理論

多くの固体は、弾性的性質のほかには塑性的性質や粘性的性質を示すことが知られている。しかし、このような固体に自由振動を起させた後、外からのエネルギーの供給を断つと、固体の振動は次第に減衰し遂には静止してしまふ。これは固体内部で、変位に抵抗しエネルギーを消費する機構が存在すること、すなわち内部摩擦が生ずることによるものとされている。内部摩擦の本質については、ひずみ速度に関連する粘性的要素と速度とは無関係な塑性的要素が考えられるが、音波や振動のようにひずみが小さい場合には、粘性的要素が内部摩擦の主たるものと考えられている。

粘性抵抗を有する固体物質の運動方程式は、弾性と粘性の対応を考慮すると次のように表わされる。

ここに、 $\nabla^2 \left(= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$: ラプラスの演算子、 η : ずり粘性率、 η_v : 体積粘性率、 G : ずり弾性率、 K : 体積弾性率、 e_v : 体積ひずみ、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の変位

また、弾性におけるラーメの定数 λ, μ と粘性率 η_1, η_2 とをそれぞれ対応させると、つぎに示すような弾性~粘性対応を得る。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= G && \leftrightarrow && \eta_1 = \eta \\ \lambda + \mu &= K + \frac{G}{3} && \leftrightarrow && \eta_1 + \eta_2 = \eta_v + \frac{\eta}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Eq. (2)に示す対応を用いて、Eq. (1)を書き直すと、

$$\left. \begin{aligned} G\nabla^2 u + \left(K + \frac{G}{3}\right) \frac{\partial e_v}{\partial x} + \eta\nabla^2 \dot{u} + \left(\eta_v + \frac{\eta}{3}\right) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ G\nabla^2 v + \left(K + \frac{G}{3}\right) \frac{\partial e_v}{\partial y} + \eta\nabla^2 \dot{v} + \left(\eta_v + \frac{\eta}{3}\right) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ G\nabla^2 w + \left(K + \frac{G}{3}\right) \frac{\partial e_v}{\partial z} + \eta\nabla^2 \dot{w} + \left(\eta_v + \frac{\eta}{3}\right) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu p^2 u + (\lambda + \mu) \frac{\partial e_v}{\partial x} + \eta_1 p^2 \dot{u} + (\eta_1 + \eta_2) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial x} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \mu p^2 v + (\lambda + \mu) \frac{\partial e_v}{\partial y} + \eta_1 p^2 \dot{v} + (\eta_1 + \eta_2) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \mu p^2 w + (\lambda + \mu) \frac{\partial e_v}{\partial z} + \eta_1 p^2 \dot{w} + (\eta_1 + \eta_2) \frac{\partial \dot{e}_v}{\partial z} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} (3)$$

となる。また、Eq. (1)を上から順に x, y, z で偏微分して加え合わせると、

$$\left(K + \frac{4}{3}G \right) p^2 e_v + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) p^2 \dot{e}_v = \rho \frac{\partial^2 e_v}{\partial t^2} \quad (4)$$

となり、これは体積ひずみの伝播に関する波動方程式を表わす。さらに、Eq. (1)の第2式、第3式をそれぞれ x, y で偏微分してその差を取ると、

$$G p^2 \omega_x + \eta p^2 \dot{\omega}_x = \rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} \quad (5)$$

となり、この式は x 軸に関する回転成分 ω_x の伝播に関する波動方程式を表わす。ここに、

$$2\omega_x = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \quad (6)$$

であり、他の回転成分 ω_y, ω_z についても同様な波動方程式が得られる。すなわち、これらの方程式は、粘弾性体無限媒体中の横波の伝播に関する波動方程式である。

ここで、任意の方向、たとえば x 軸方向に伝播する平面波を考えると、各変位成分は x と t のみの関数であるから、Eq. (1)をそれぞれ x, y, z で偏微分して加えると、

$$\left. \begin{aligned} \left(K + \frac{4}{3}G \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) \frac{\partial^2 \dot{u}}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ G \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 \dot{v}}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \\ G \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x^2} &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} (7)$$

の波動方程式が得られる。

つぎに縦波の伝播について考えてみる。粘性抵抗による波動の減衰が、ニュートン流体の場合と同様に距離とともに指数関数的に減衰するものと考え、Eq. (7)の第一式は次の解を満足する。すなわち

$$U = U_0 e^{-\alpha x} \cdot e^{-ik(x-ct)} \quad (8)$$

ここに、 U_0 ：初期条件で与えられる振幅、 $e^{-\alpha x}$ ：距離による波動の減衰、 α ：減衰定数、 c ：波の伝播速度。

なお、 kc は角周波数を表わし、波長を λ 、周波数を n とすれば、これらの関係はつぎのようになる。

$$kc = 2\pi n, \quad n = c/\lambda, \quad \lambda = 2\pi/k \quad (9)$$

Eq. (8)を x, t で偏微分して、Eq. (7)の第一式に代入すると、

$$\begin{aligned} \left(K + \frac{4}{3}G \right) (\alpha^2 - k^2) + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) (-2k^2 \alpha c) + \rho k^2 c^2 \\ + i \left\{ \left(K + \frac{4}{3}G \right) 2\alpha k + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) kc (\alpha^2 - k^2) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。従って、

$$\left(K + \frac{4}{3}G \right) (\alpha^2 - k^2) + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) (-2k^2 \alpha c) + \rho k^2 c^2 = 0$$

$$\left(K + \frac{4}{3}G \right) 2\alpha k + \left(\eta_v + \frac{4}{3}\eta \right) kc (\alpha^2 - k^2) = 0$$

から、 $\left(K + \frac{4}{3}G \right)$ (弾性抵抗成分) を消去すると、

$$\eta_v + \frac{4}{3}\eta = \frac{2\alpha \rho k^2 c}{(\alpha^2 + k^2)^2} \quad (11)$$

となる。波動が低周波の場合には、体積変化に対する抵抗すなわち体積粘性のために生ずる減衰は無視できるから、 $\eta_v = 0$ とおくと

$$\eta = \frac{3\alpha \rho k^2 c}{2(\alpha^2 + k^2)^2}, \quad (12)$$

同様に動的弾性定数についても

$$K + \frac{4}{3}G = \frac{\rho k^2 c^2 (k^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + k^2)^2} \quad (13)$$

の関係が得られる。さらに、粘弾性体中の縦波伝播速度 v_l と減衰定数 α_l は、 α_l が小さく、 $\alpha_l \ll k$ の場合には、Eqs. (11), (13) はつぎのように簡単になる。すなわち、

$$v_l = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} G}{\rho}} \quad (14)$$

$$\alpha_l = \frac{2\pi^2 n^2}{\rho v_l^3} \left(\eta_v + \frac{4}{3} \eta \right) \quad (15)$$

ここで、完全流体では $G = 0$ 、また粘弾性体では $G \ll K$ より、 $G = 0$ とみわたせるから

$$v_l = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (16)$$

と表わすことができる。

横波についても同様な解析が可能であり、結果のみを記すと、横波の伝播速度 v_t と減衰定数 α_t は、

$$v_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad \alpha_t = \frac{2\pi^2 n^2}{\rho v_t^3} \cdot \eta \quad (17)$$

となる。

3 実験概要

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材には標準砂 (記号: S)、川砂 (N) 造粒型人工軽量骨材 (ライオナイト, L) および非造粒型人工軽骨 (ウベライト, U) の 4 種類を選んだ。

なお、ライオナイトについては、5 種類の粒径に分類 (5~2.5^{mm} (記号: A), 2.5~1.2^{mm} (B), 1.2~0.6^{mm} (C), 0.6~0.3^{mm} (D), 0.3^{mm}以下 (E)) としたものを実験に供した。これら細骨材の物理的性質及び粒度分布を Table-I に示す。

(2) ペーストおよびモルタルの配合

配合条件は、セメント細骨材比 (c/s) を 1/1 および 1/2 の 2 種類、水セメント比 (w/c) は 5% おきに 30~60% の範囲で選び、Table-II に示すような配合を決定した。

(3) 試験方法

細骨材はすべて表乾状態に調整して使用した。練り混ぜには、容量 20ℓ の電動式 3 段可変パンタイプのみキサを用い、計量した材料を細骨材、セメントの順にみキサ中に投入して 1 分間空練りを行なった後、注水して、低中、高の速度でそれぞれ 1 分間ずつ計 3 分間練り混ぜた。

本試験のために試作した打撃式弾性波伝播測定器と測定方法を Fig. 1 のブロックダイアグラムで示す。この装置は、直径 30cm、高さ 7.5cm、厚さ 1.0cm のアクリル製の円形容器と振子式に打撃を与えるハンマーと、ハンマーによる打撃振動をできるだけ平面波として試料に伝えるための鋼製の振動板 (80×80×5mm) から成る。なお、ハンマーには発振を電気信号に変換するための圧電型振動受信子 (φ20mm、厚さ 5mm) を取り付けてある。

検出器 (ピックアップ) には圧電型の振動受信子を用い、これを鋼棒の先端に接着して、鋼棒を塩化ビニール

Table I Physical properties and grading of fine aggregate used.

Kinds of aggregate	Specific gravity (S.S.D.)	Specific gravity (O.D.)	Water absorption (%)	Bulk density (kg/m ³)	Grading (remaining % by weight)					Fineness Modulus F.M.	
					5.0mm	2.5	1.2	0.6	0.3		0.15
Standard sand (S)	2.65	2.64	0.65	1530					1	96	0.97
River sand (N)	2.56	2.55	1.23	1530	0	1	15	50	87	100	2.53
Lightweight aggregate (L)	1.37	1.33	4.00	1100	0	9	42	61	69	81	2.62
Lightweight aggregate (U)	1.97	1.70	11.50	1120	0	25	53	71	84	92	3.25

Table II Mix proportions

Kinds of paste or mortar			C (kg)	W (ℓ)	S (kg)	Kinds of mortar			C (kg)	W (ℓ)	S (kg)	
c/s	w/c (%)	c/s				w/c (%)						
P		25	1790	446		ML	1/4	30	836	251	836	
		30	1620	486	35			803	281	803		
		35	1500	524	40			772	309	772		
		40	1390	557	45			743	334	743		
		45	1300	586	50			717	358	717		
		50	1220	612	55			692	380	692		
MS	1/4	30	1005	302	1005	ML	1/2	40	534	213	1068	
		35	975	335	975			45	520	234	1040	
		40	913	365	913			50	507	253	1014	
		45	874	393	874			55	494	272	988	
		50	837	418	837			60	482	289	964	
		55	803	442	803			65	471	306	942	
MN	1/2	45	657	296	1314	MU	1/4	30	874	262	874	
		50	636	318	1272			35	838	293	838	
		55	617	339	1234			40	804	322	804	
		60	598	359	1196			45	773	348	773	
		65	581	377	1161			50	744	372	744	
								55	717	395	717	
MN	1/4	25	1055	264	1055	MU	1/2	40	565	226	1130	
		30	1003	301	1003			45	549	247	1099	
		35	955	334	955			50	535	261	1066	
		40	912	365	912			55	521	286	1042	
		45	871	392	871			60	508	305	1015	
		50	835	418	835			65	495	322	990	
ML	1/2	45	655	295	1310	ML	For different particle size	1/4	30	836	251	836
		50	634	317	1268			35	803	281	803	
		55	615	338	1230			40	772	309	772	
		60	596	358	1192			45	743	334	743	
		65	579	376	1157			50	716	358	716	
								55	692	381	692	
				60	667	400	667					

製の薄板に固定した。なお、伝播波の乱れを防ぐために、容器と固定用の塩ビ板との間にスポンジを入れて絶縁した。

練混ぜを完了した試料は、容器の中に2層に分けて詰め、各層を突き棒で25回ずつ突き固めた。試料の上面をこてでならした後、Fig.1 に示すように2つのピックアップ P_1 、 P_2 を振動板に対して垂直な一直線上に所定

の間隔でセットした。2つのピックアップ間の距離 (l) は、ブラウン管上において最も明りょうな振動波形が得られる5 cm とし、また振動板から第1ピックアップまでの距離は、伝播波の容器側壁などによる乱れの影響と伝播波の減衰を考慮して3 cm とした。

ピックアップで受信した信号は、増幅器を経てシンクロスコープの垂直偏向端子に導かれ、一方、ハンマーに

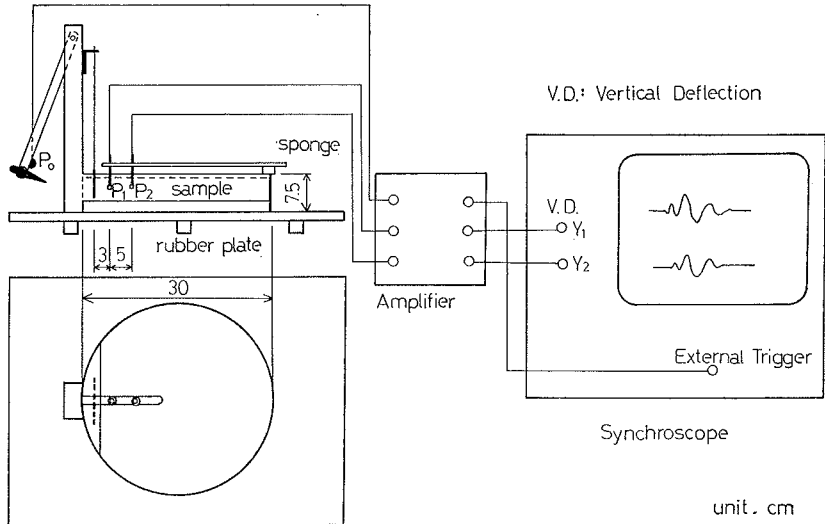


Fig. 1 Apparatus and block diagram

よる打撃信号は P_0 で受信され、増幅器を経てシンクロスコープの外部トリガー回路に導かれる。従って、ハンマーが振動板に打撃を与えた瞬間にシンクロスコープは掃引を開始し、試料中を伝わった波がピックアップ P_1, P_2 に達すると、それぞれ垂直偏向 Y_1, Y_2 を生じてピックアップが受信した波形をブラウン管上に写し出すことになる。

測定は、注水後約10分間（練混ぜ完了後約7分間）で完了するようにした。それは、以前に行なった超音波伝播速度の測定結果¹¹⁾より、伝播速度は試料練混ぜ後15～30分頃から急激に速くなること、および発振のための打撃回数を重ねると振動板近傍およびピックアップの周囲で試料が材料分離を起し、フレッシュモルタルの性状に変化が生ずるおそれがあることなどからである。

ブラウン管上の波形は、ポロライド写真機で撮影し、そのポロライド写真を万能投影機（倍率20倍）で拡大して Fig. 2 に示すような実測値を読みとった。

(3) 実測値の整理

ポロライド写真を万能投影機で拡大すると、Fig. 2 に模式的に示すような波形が得られる。この図から $a, t, \Delta t$ の各値を読み取り、次式に示すように測定値が求められる。

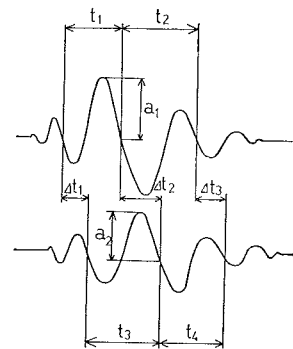


Fig. 2 Wave modes

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -\frac{1}{l} \log_e \frac{a_2}{a_1} \quad (1/cm) \\ c &= \frac{l}{\Delta t} \quad (cm/sec) \\ k &= \frac{2\pi}{ct} \quad (1/cm) \end{aligned} \right\} (18)$$

ここに、 α : 減衰定数, $c (=v)$: 波速 (v : 伝播速度), l : 2つのピックアップ間の距離

これらの測定値を Eq. (12), Eq. (13) において $G \ll$

K として求めた Eq. (19) および Eq. (20) に代入すると、特性値 η , K および τ が求まる。

$$\eta = \frac{3\alpha\rho k^2 c}{2(\alpha^2 + k^2)^2} \quad (\text{dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2) \quad (12)$$

$$K = \frac{\rho k^2 c^2 (k^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + k^2)^2} \quad (\text{dyne}/\text{cm}^2) \quad (19)$$

$$\tau = \frac{\eta}{K} = \frac{3\alpha}{2c(k^2 - \alpha^2)} \quad (\text{sec}) \quad (20)$$

ここに τ : 遅延時間 (クリープ現象の場合) あるいは緩和時間 (応力緩和現象の場合), η , K : 前出。

4 実験結果と考察

(1) 伝播速度 (v)

Fig. 3 に伝播速度と水セメント比との関係を示す。一般的に、伝播速度は水セメント比の増加とともに減少する傾向が認められる。MLを除くペースト、モルタルにおいては、骨材の種類や水セメント比の大きさによってやや異なるが、 w/c が30%以上では伝播速度はほぼ100m/sec の値を示す。骨材量 (c/s) の影響を見ると、 $c/s=1/4$ の場合よりも $c/s=1/2$ の方が伝播速度はやや大きく現われているが、その差は非常に小さく、 v は骨材量によって殆んど影響されないと判断する方が妥当であろう。さらに、ペーストとモルタルの伝播速度を比較すると、水セメント比が小さいときあるいは c/s が大きい (細骨量が少ない) 場合に、ペーストの v がモルタルのそれよりもやや大きく現われている。MLは、Fig. 3 から判るように、他の骨材を用いたモルタル

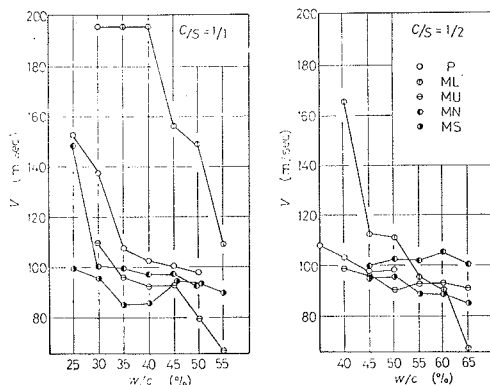


Fig. 3 Relationships between V and w/c

と比較するとかなり異なる傾向を示すが、この原因が骨材の有する特性によるものかあるいは実験の過程において生じたものかは不明である。

なお、骨材の粒径別でも同様の検討を行なったが明確な傾向は認められなかった。

以上は打撃法によって得られた伝播速度の一般的な傾向であるが、ここで得られた結果と実験資料の配合条件が本実験と全く同じである超音波伝播速度に関する実験結果¹¹⁾を比較検討してみる。前述したように打撃法による伝播速度は 100m/sec 前後の低い値を示すのに対して、超音波法による伝播速度 (注水後約 10分における値) は、骨材の種類、骨材粒度および w/c によって 100~600m/sec のかなり広い範囲にあり、従って両者の間には明確な対応は認められない。このことから、フレッシュモルタル中を伝わる弾性波の伝播速度は、周波数の大きさ、すなわち音波域 (打撃法では 1000~2000 H_z) かあるいは超音波域 (発信子、受信子ともに 20000 H_z) かによって相当異なるものとなることが推察される。

(2) 減衰定数 (α)

Fig. 4 に減衰定数と水セメント比との関係を示す。先ず、 $c/s=1/4$ の場合について見ると、 w/c が増加するにつれて α はゆるやかに減少する。骨材別では、MU がかなり大きい値を示す他は、骨材による差が小さくペーストと良く似た傾向を示す。

$c/s=1/2$ の場合には、ML と MU の人工軽骨を用いたモルタルの α が極めて大きな値を示すし、 w/c の変化による影響も大きいのに対し、天然骨材を用いた MN, MS では前者よりも α の値が小さく、 w/c によ

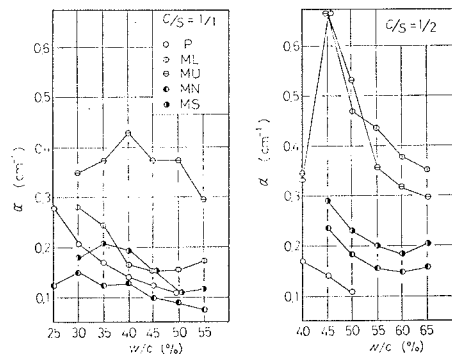


Fig. 4 Relationships between α and w/c

る影響もそれほど著くない。なお、いずれのモルタルにおいてもペーストよりも大きい α が得られた。

以上述べた伝播波の減衰性をまとめると、一般にペーストよりもモルタルの方が、さらには同一骨材の場合には骨材量が増えるほど減衰性が著しくなる。また骨材の種類別では、天然骨材を用いたモルタルの方が人工軽骨モルタルよりも減衰性が小さく、いずれの場合においても w/c が大きくなるにしたがって減衰性が小さくなる傾向が認められた。

なお、骨材の粒径別での比較では、単一粒径骨材モルタルが与える減衰定数は混合粒度のそれよりもかなり大きく一般的傾向以外には明確な関係が得られなかった。

(3) ざり粘性率 (η), 体積弾性率 (K) および遅延時間 (τ)

$c/s=1/4$ におけるそれぞれの特性値と水セメント比との関係を Fig. 5 に、粒径別 (ML) のそれらの関係を Fig. 6 に示す。

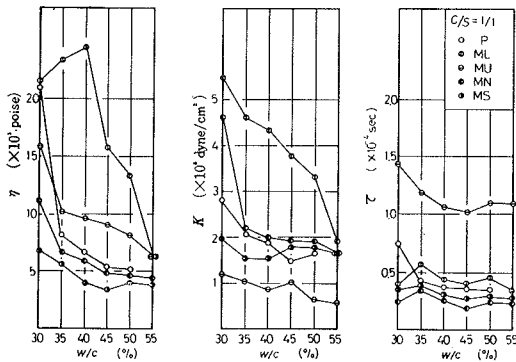


Fig. 5 Relationships between η and w/c

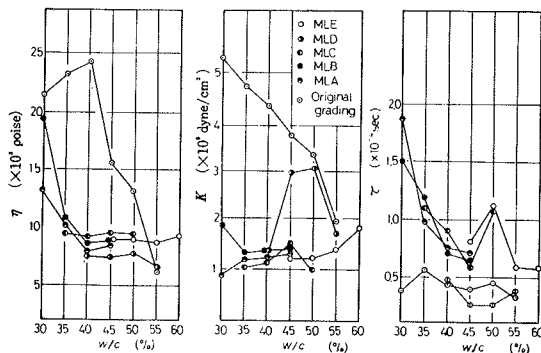


Fig. 6 Relationships between η , K , τ and w/c in mortar with several particle sizes (ML)

i) ざり粘性率

人工軽骨モルタルの η はペーストのそれよりもかなり大きいに対し、天然骨材モルタルの η はペーストと同じかやや小さい程度である。また、 w/c が増加するに従って η は減少するが、 w/c が35%以上になると η の変化は非常に緩慢になる。

つぎに粒径別に考察すると、原粒度の骨材を用いたモルタルにおいては w/c が40%を越えるとはほぼ直線的に η が減少する。それに対し、単一粒径の骨材を用いたモルタルでは、粒径の大きさにかかわらずほぼ一定の η の値を示し、さらに w/c が40%以上では w/c の変化による影響がほとんど現われていない。これは Fig. 5 で示した MS の傾向からもある程度推察できる。MS は整粒の標準砂を用いたモルタルであるが、他の混合骨材の場合よりも η の値は小さく、かつ w/c の変化による η の差も非常に小さい。このことから整粒、すなわち単一粒径の骨材を用いると η は小さくなり、 w/c の影響もあまり現われなくなると考えられる。しかし、同じ天然骨材を用いた MS と MN を比較すると、混合骨材 (MN) であっても整粒の場合 (MS) とほとんど変わらない。従って、整粒 (単一粒径) は確かに η の値を小さくする要因の一つと考えられるが、 w/c が大きくなると η の値はほとんど一定になることをも考慮に入ると、単位水量の影響もかなり大きいものと推察できる。

ii) 体積弾性率

全般的に、 w/c が増加すると K の値は減少する傾向が認められる。中でも ML においては、 η の場合と同様に K の値が最も大きく、 w/c の増加による K の減少の程度も顕著である。それに対して天然骨材を用いた MN, MS においては、 w/c が35%よりも大きくなると w/c による K の変化が非常に小さく両者はほぼ一定の値になり、さらに MU は最も小さい η の値を与え、 w/c との関係は天然骨材の場合と同じである。

つぎに粒径による影響を見ると、原粒度 (混合粒度) モルタルでは w/c の増加につれて K はほぼ直線的に減少するが、単一粒径 (整粒) モルタルではこの傾向が明確に現われない。粒径別では、MLD の K の値は大きい、他の粒径ではほとんど等しく、原粒度モルタルに比べると K の値は非常に小さい。これらの要因としては、前の η の場合と同様のことが考えられる以外に、とくに体積弾性率においては、骨材の粒径よりもその粒度分布が (骨材粒度) が支配的要因になるものと考えら

れる。

iii) 遅延時間

全般的にみると w/c の増加にもなって τ はゆるやかに減小する傾向が認められる。前述した η , K においては ML が特異な傾向を示したが、 τ においては MU が他のモルタルよりも大きな値を与えている。なお MU 以外のモルタルの τ はペーストのそれと大差はない。

つぎに粒径による影響は、前述した傾向と同様に w/c の増加とともに τ は減少し、さらに単一粒径モルタルの τ は原粒度モルタルのそれよりもかなり大きくなる。これらのことより、遅延時間の値は、 η や K の傾向とは逆に、大小粒を適当に混合することによってかなり小さくなるものと考えられる。

(4) v , α と η , K , τ との相関

第2節で述べたように実測値より直接得られるのは v , k , α の測定値であり、 η , K , τ のレオロジー特性値はそれらの値から計算で求められる。しかもこれらの特性値は Eqs. (12), (16), (20) で示したように、簡単な一対一対応ではなく複雑に組み合わされている。ここでは測定値と特性値との相関について考えてみることにする。

i) v と η との相関 (Fig. 7)

v と η との間には Fig. 7 に示すように、骨材量にかかわらずほぼ直線関係が認められる。骨材別では、ML と P においてかなり大きい範囲の v (100~200 cm/sec) と η (5~30 poise) を、MU では小さい η を与えるのに対し、天然骨材を用いたモルタルでは η が 5~10 poise, v が 100 m/sec と非常に範囲が狭くなっている。 v と η との間に直線関係が得られることは、Eq. (12) において $3ak^2/2(\alpha^2+k^2)^2$ を比例定数とみな

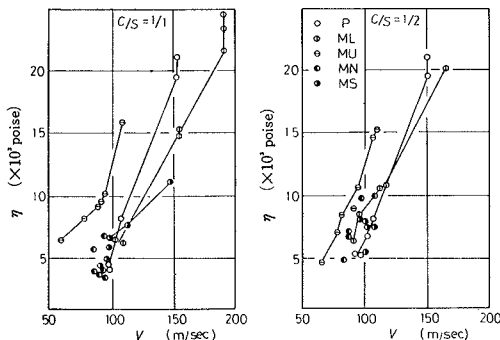


Fig. 7 Relationships between η and V

すことができることを意味している。

ii) v と K との相関 (Fig. 8)

Fig. 8 に示すように v と K との間にはゆるやかな曲線関係が認められ、ML ($c/s=1/2$) と MU を含むグループとそれ以外 (P を含む) のグループの 2 つに分けて考えることができる。しかし、2 つのグループに分かれる理由については本実験の範囲だけで判断することはできない。i) と同様に、Eq. (19) において $K=\rho Av^2$, $A=k^2(k^2-\alpha^2)/(\alpha^2+k^2)^2$ とおくと、棒状物性中の弾性波伝播速度 (V_B) が弾性係数 (E) と、 $E=\rho V_B^2$ で結びつけられていることと符号する。

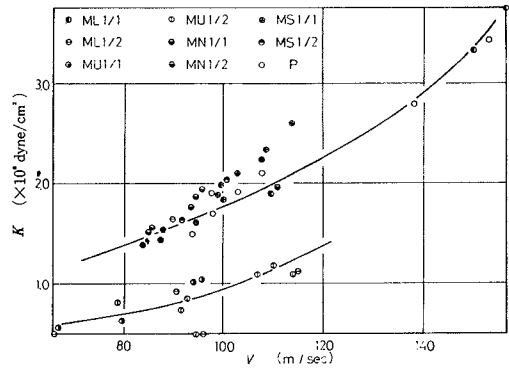


Fig. 8 Relationships between K and V

iii) α と τ との相関 (Fig. 9)

Fig. 9 に示すように、 α と τ との間には α の増加とともに τ が急激に大きくなる関係が存在し、この関係 ($\tau \propto \alpha^2$) は骨材の種類や骨材量とは無関係にほぼ一本の曲線で表わすことができる。このことは、 $\alpha \sim w/c$ (Fig. 4) や $\tau \sim w/c$ (Figs. 5, 6) を比較すると、その類似性が明確に現われていることから推測できる。

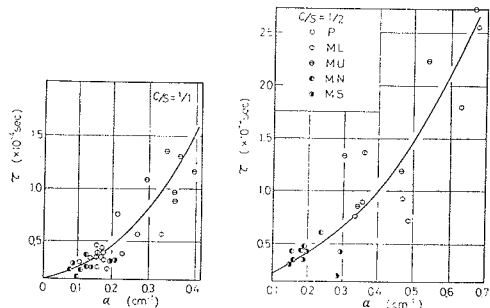


Fig. 9 Relationships between τ and α

いずれにしてもフレッシュコンクリート中を伝わる弾性波の伝播において、伝播波の減衰と遅延時間との間に明確な相関性が認められることは、極めて興味ある現象の把握と考えられるので、今後はこの点を更に詳しく検討して行き度い。

なお、測定値のうち k と w/c との間には明確な傾向が認められず、さらに k とレオロジー特性値 η , K , τ , α と η , K との間にはなんらの相関性も認められなかったので、図によるその説明と考察は省略する。

5 結 語

本研究は、試作した打撃式の弾性波伝播速度測定器を用いて、種々のフレッシュモルタル（水セメント比、細骨材量、骨材種別、粒径など）の弾性波伝播特性（伝播速度、減衰定数、ずり粘性率、体積弾性率、遅延時間など）を解析し、その結果に対し若干の考察を加えたものである。

本試験においては、測定器そのものの性能評価ともかねたため上述したように比較的単純な配合条件を設定した。従って、弾性波伝播特性によってフレッシュコンクリートのレオロジー的性質を詳しく論ずるためには、フレッシュコンクリートのワーカビリティに著しい影響を及ぼす骨材粒度（粗粒率）や化学混和剤の使用をも含めた広範囲にわたる実験を行なわなければならないと考えられる。

さらにまた、測定器の形状と方法、打撃方法の改善、波形の記録方法、などの問題も残されている。

今後は、これらの実験上の問題点を解決しつつ研究を継続して行く予定である。

ここでは、本試験の範囲内で明らかになった点を列挙し、結語にかえる。

(1) 弾性波伝播速度は 100m/sec 前後の値を示し、一般的に w/c が増加するにつれて減小する傾向が認められた。しかし、同一配合のモルタルであっても、周波数が大きくなると伝播速度も速くなる傾向が見られ、打撃法と超音波法とで伝播速度にかなりの差が現われた。

(2) 伝播波の減衰性は $0.1 \sim 0.4 \text{ cm}^{-1}$ の範囲にあり、 w/c が増加すればその値は小さくなる。また、ペーストよりもモルタルの方が減衰性が著しく、同一骨材の場合には骨材量が増すほど減衰性が大となる。さらに単一粒径（整粒）モルタルが示す減衰は混合粒度骨材を用いたモルタルの場合よりも大きい。

(3) ずり粘性率は $5 \sim 15 \times 10^3$ poise の範囲にあり、 w/c が増加するにしたがって減小する傾向がある。また η と伝播速度 v との間に比例関係が認められた。

(4) 体積弾性率は $0.5 \sim 2.0 \times 10^8$ dyne/cm² の範囲にあって、一般的に w/c が増加するにつれて K は減小する傾向が認められた。体積弾性率は骨材の粒径よりもその粒度分布に支配される傾向が強く、単一粒径モルタルの K の方が混合粒度モルタルのそれよりも小さくなる。また、 K と v との間にも比例関係が認められた。

(5) 遅延時間は $0.5 \sim 1.3 \times 10^{-4}$ sec の範囲にあり、 w/c が増すとゆるやかに減小し、さらに減衰定数との間に明らかに相関性が認められた。

なお、本試験は、著者の中の一人に対して交付された文部省科学研究費による成果の一部であり、さらに研究遂行上材料研究室の諸氏から多大の援助を給わったことに深甚の謝辞を申し述べる次第である。

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵, フレッシュコンクリートの性質—レオロジー的アプローチ—; 材料, Vol. 24, No. 206, 1975年5月, pp. 358~367.
- 2) 西林, 木山, 阪田: フレッシュペーストならびにモルタルの粘性の性質に関する基礎的研究, 土木学会第26回年次学術講演会概要集, 第V部, 1971年10月, pp. 239~242.
- 3) 西林, 木山, 阪田: フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する研究—一回転粘度計の設計およびペースト, モルタルについての2, 3の実験—, 材料, Vol. 24, No. 206, 1975年5月, pp. 418~424.
- 4) 西林, 阪田, 木山: フレッシュモルタルのレオロジー的性質に関する研究—細骨材粒度の影響について—, 土木学会第27回年次学術講演会概要集, 第V部, 1972年10月, pp. 77~80.
- 5) 木山, 西林, 阪田: フレッシュモルタルのレオロジー的性質に関する研究—細骨材粒度と化学混和剤の影響—, 土木学会第28回年次学術講演会概要集, 第5部, 1973年10月, pp. 136~138.
- 6) 西林, 木山, 藤村: フレッシュモルタルのレオロジー的性質に関する研究—配合と化学混和剤の影響—, 土木学会第28回年次学術講演会概要集, 第V部, 1973年10月, pp. 139~141.

- 7) 西林, 木山, 吉田; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究—三軸試験による考察—, 土木学会第29回年次学術講演会概要集, 第V部, 1974年10月, pp. 79~80.
- 8) 西林, 木山, 阪田; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究—三軸試験による一考察—, 土木学会第30回年次学術講演会概要集, 第V部, 1975年10月, pp. 103~104.
- 9) 西林, 木山, 藤村; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究—弾性波伝播特性について—, 土木学会第29回年次学術講演会概要集, 第V部, 1974年10月, pp. 81~82.
- 10) 西林, 木山, 井上; フレッシュコンクリートのレオロジー的性質に関する基礎的研究—弾性波伝播特性による一考察—, 土木学会第30回年次学術講演会概要集, 第V部, 1975年10月, pp. 105~106.
- 11) S. NISHIBAYASHI, H. KIYAMA and K. SAKATA; The Fundamental Study on the Rheological Properties of Fresh Concrete—The Propagation Characteristics under the Ultrasonic Transmitted—, Reports of the Faculty of Engineering, Tottori University, Vol. 6, No.1, March 1976, pp. 109~125.