

フレッシュコンクリート中の波動伝播特性に関する研究

西林 新蔵*・吉野 公*・前田 正敏**・前島 博之***

(1980年5月31日受理)

Some Characteristics of Wave Propagation in Fresh Concrete

Shinzo NISHIBAYASHI,* Akira YOSHINO,* Masatoshi MAETA,** Hiroyuki MAEZIMA***

(Received May 31, 1980)

Recently, in order to evaluate quantitatively the characteristics of fresh concrete, rheological approaches which are the field of science dealing with the deformation and the flow of material have been adopted.

In this paper, dynamic rheological characteristics of fresh paste, mortar and concrete obtained experimentally with the wave propagation method are described.

An apparatus for measuring the wave propagation in fresh concrete was designed and manufactured through the experimental works. Using this apparatus, the propagation characteristics such as velocity and decay of the wave in fresh paste, mortar and concrete are measured for various factors of water-cement ratio and the frequencies of the waves, and the rheological characteristics which depend on the times after mixing are investigated. The hardening process of fresh concrete are also discussed.

1. はじめに

最近フレッシュコンクリートの物性、すなわち一般にワーカビリティと総称されている特性をより科学的に定量化していくための手段として、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、いわゆるレオロジー的考察が行われるようになってきた。当材料学研究室においても、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^{1)~6)}。本研究もこの研究プロジェクトの一環として行ったものである。

従来からのフレッシュコンクリートのレオロジー的解析は、回転粘度計等に代表されるような定常流動を取り

扱った静的方法が大部分である。しかし振動外力や振動変形が作用した場合のフレッシュコンクリートの挙動や、凝結、硬化過程の物性変化をレオロジー的に評価していくには、いわゆる動的特性を明らかにしていく必要がある。

本研究は、フレッシュコンクリートの動的なレオロジー特性を把握していく方法として、波動伝播法を採り上げ、電気的に振動を与える弾性波伝播測定器を試作して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の凝結、硬化過程における各レオロジー特性値の変化について若干の考察を加えたものである。

* 土木工学科, Dept. of Civil Engineering

** 戸田建設, Toda Construction Co. Ltd.

*** 出雲市役所, Izumo City Office

2. 波動伝播法によるレオロジー特性値の測定

粘弾性体中の波動伝播の理論から、粘性定数は、体積粘性のために生ずる減衰を無視（体積粘性率を0とする）すると

$$\eta = \frac{3\alpha\rho k^2 v}{2(\alpha^2 + k^2)^2} \dots\dots\dots (1)$$

同様に動的弾性定数は、ずり弾性率が体積弾性率に比べ無視し得ると考えると

$$K = \frac{\rho k^2 v^2 (k^2 - \alpha^2)}{(\alpha^2 + k^2)^2} \dots\dots\dots (2)$$

また遅延時間は

$$\tau = \frac{\eta}{K} = \frac{3\alpha}{2v(k^2 - \alpha^2)} \dots\dots\dots (3)$$

で表わすことができる⁶⁾。

- ここに、 η ：ずり粘性率、 K ：体積弾性率
 τ ：遅延時間、 α ：減衰定数
 v ：伝播速度、 k ： $2\pi f/v$ (f ：周波数)
 ρ ：密度

この理論に基づきフレッシュコンクリートに一定の振動外力を与え、その中を伝播する縦波の速度と距離による減衰定数を測定し、これらの伝播特性値から、ずり粘性率、体積弾性率、遅延時間等のレオロジー特性値を求めるといのが波動伝播試験法の原理である。

この原理に基づいて従来から行われてきた方法としては、いわゆる超音波による方法、打撃式弾性波伝播法があげられる。超音波による方法は硬化コンクリートに実用されている非破壊試験装置を応用したもので、単一の周波数（おおむね20~100KHz）のみでしか測定することができず、かつ波動の減衰程度を測定することができないので十分にレオロジー特性値を把握することが困難である。また打撃式弾性波伝播法はハンマーによって振動を与えるために、波動の強さ、周波数等の振動外力が十分に制御できず、それらの影響について検討することができない。また減衰定数の測定が正確に行えず、したがって測定結果のばらつきも大きく、配合要因等とレオロジー特性値との関係を十分に把握するのがむづかしい。このような従来からの測定法の問題点を解決していくためには、試料に加える振動外力としての波動の特性を十分に制御することが必要である。そこで本研究ではこれ

を電氣的に行う装置の開発を試みた。

3. 波動伝播測定器

3.1 測定器の構成

本試験のために試作した電氣的に振動を与える弾性波伝播測定器を Fig. 1 のブロックダイアグラムで示す。本装置で用いた発振子は、径40mm、厚さ20mmのチタン酸バリウム磁器を2枚の金属板ではさみ、内径45mmの鉄製円筒容器に収納したもので、チタン酸バリウム磁器のもつ圧電ひずみ効果によって振動を発生させるものである。発振波形は誘導電流によるノイズを防ぐため正弦波パルスとし、周波数、パルス数、出力電圧を制御するためにファンクションジェネレーターを使用した。

検出器（ピックアップ）にはPZT（チタン酸ジルコン酸鉛磁器）圧電素子を用い、これをアルミニウム円板（φ20mm、厚さ1mm）に接着したものをステンレス製パイプの先端に取りつけた。

試料を入れる容器は10×10×25cmの直方体形状のもので、振動吸収性に優れ、高い絶縁抵抗をもつシリコン樹脂製とした。

3.2 動作原理と解析方法

本装置の動作原理の概略は以下の通りである。すなわち、まず試料を容器に詰めピックアップ（ P_1 ）、（ P_2 ）を所定の間隔で発振子の端面の中心線延長上にその受感面が平行になるように試料中に埋設する。そこでファンクションジェネレーターによってパルス波を発生させ、発振子を駆動させると、発振子は厚み振動によって試料へ縦波パルスを伝える。波形の記憶部であるデジタルメモリーは、パルス波の発振と同時にファンクションジェネレーターからの同期信号によって記憶を開始する。一方試料中を伝播した波動はピックアップで電気信号（電圧）に変換されてデジタルメモリーに記憶される。そしてデジタルメモリーに記憶された波形をブラウン管上に写し出し、所定の値を読み取り以下の解析を行う。

ブラウン管上には Fig. 2 に示すような波形が現われ、これから $4t_1$ 、 $4t_2$ 、 a_1 、 a_2 を読み取る。 $4t_1$ 、 $4t_2$ は波動の伝播時間を表わすもので、この平均値を伝播時間（ $4t$ ）とする。さらに、試料中を伝播する波動の振幅は距離とともに指数的に減少すると考え、振幅の比 a_2/a_1 の自然対数をとって求める。すなわち、

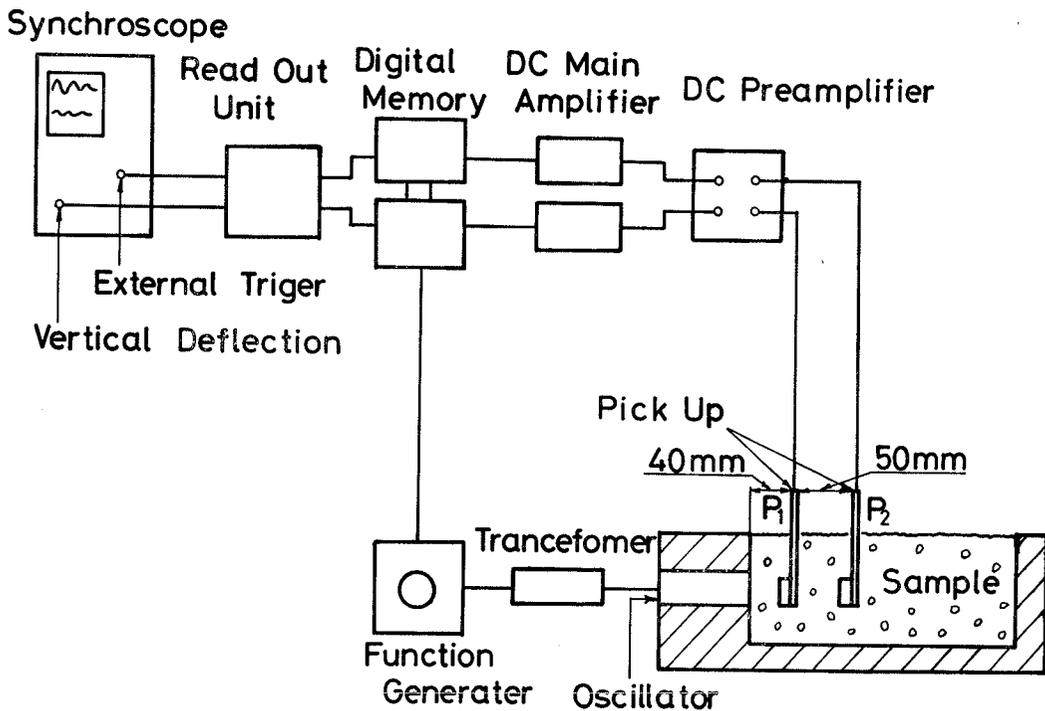


Fig. 1 Apparatus and block diagram

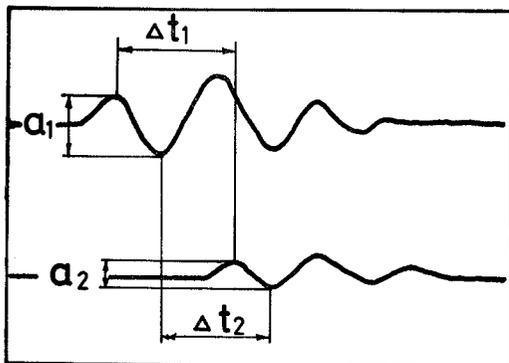


Fig. 2 Wave modes

$$\alpha = -\frac{1}{l} \log_e \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{cm}^{-1})$$

$$v = \frac{l}{\Delta t} \quad (\text{cm/sec.})$$

$$k = \frac{2\pi f}{v} \quad (\text{cm}^{-1})$$

ここに、 l ：ピックアップ間の距離 (cm)

k ：角周波数と伝播速度との比

によって波動の伝播特性値を求めることができる。この値を式 (1), (2), (3) に代入すると、レオロジー特性値 η , K および τ が求まる。

4. 実験概要

4.1 実験計画

本実験で用いた試料は、セメントペースト、モルタル、コンクリートについてそれぞれ水セメント比を 3 種類 (40, 50, 60%) 変化させた合計 9 種類の配合である。

測定周波数は、1 KHz ~ 10 KHz 間を 1 KHz 間隔で 10 段階に変化させた。また測定時間は注水後 10 分から 190 分まで 20 分間隔で行った。

4.2 使用料および試料の配合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には川砂と海砂を混合し、土木学会標準粒度範囲のほぼ中央値になるように粒度調整したもの (比重：2.60, F. M. : 2.79) を用いた。また粗骨材は碎石 (比重：

2.70, 最大寸法: 15mm) を使用した。

試料の配合は、水セメント比を 40, 50, 60% の3種類とし、モルタルでは細骨材容積比を 40% とした。またコンクリートでは細骨材容積比を 40%, 粗骨材容積比を 40% とした。すなわち、ペースト、モルタル、コンクリートそれぞれ水セメント比の異なる3種類の配合について、合計9種類の配合の試料について実験を行った。示方配合をまとめて Table I に示す。

Table I Mix proportions

| Sample | Water (kg/m ³) | Cement (kg/m ³) | Fine aggregate (kg/m ³) | Coarse aggregate (kg/m ³) |
|--------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| P-40 | 558 | 1394 | — | — |
| P-50 | 612 | 1223 | — | — |
| P-60 | 654 | 1090 | — | — |
| M-40 | 335 | 836 | 1040 | — |
| M-50 | 367 | 734 | 1040 | — |
| M-60 | 392 | 653 | 1040 | — |
| C-40 | 201 | 502 | 624 | 1080 |
| C-50 | 220 | 440 | 624 | 1080 |
| C-60 | 235 | 392 | 624 | 1080 |

4.3 実験方法

試料の練混ぜにあたっては、骨材は表面乾燥飽水状態で使用し、試料の温度がほぼ 20°C になるようにセメント以外の材料を保温あるいは冷却して使用した。練混ぜはモルタルミキサーを使用し、注水後 3 分間練り混ぜた後、測定容器に詰め、とくにピックアップおよび発振子の周辺に試料が十分行きわたるように締固めを行った。なお測定はすべて室温 20°C、湿度 90% の恒温室内で行った。

測定開始時間は注水後 10 分とし、各設定測定時間において 1 分以内に周波数を変化させた縦波を試料中に順次伝播させた。解析にあたってはシンクロスコープのブラウン管上に写し出された波形を写真撮影し、万能投影器にかけて測定値の読み取りを行った。

4.4 実験結果および考察

4.4.1 伝播速度

Fig. 3 (a), (b), (c) に水セメント比が 50% のペー

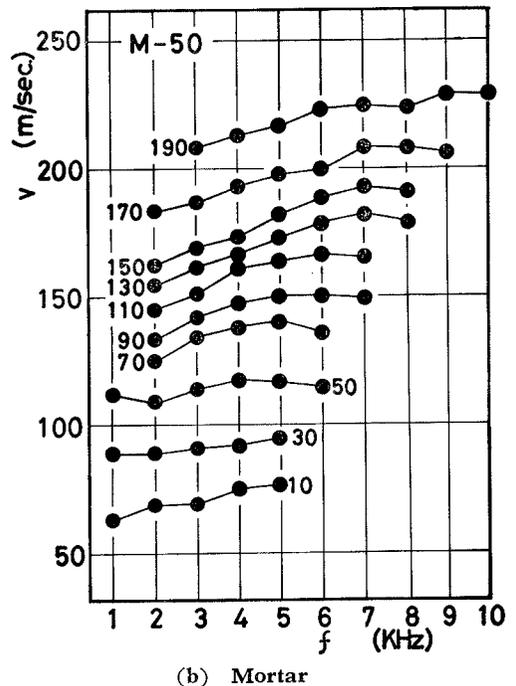
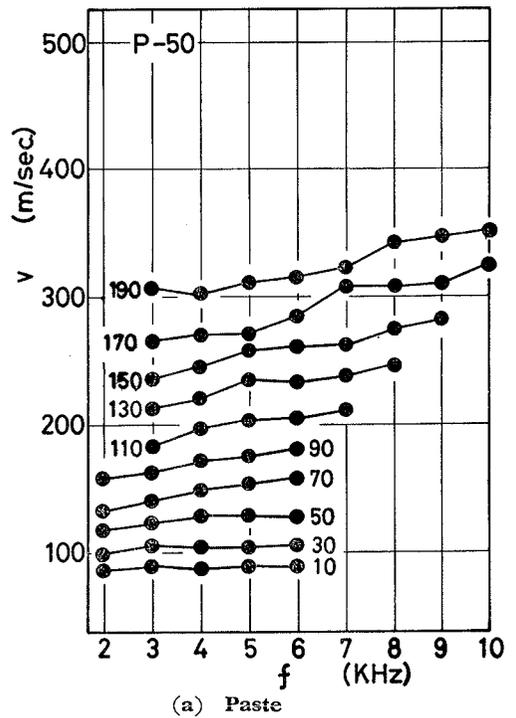


Fig. 3 Relationships between v and f

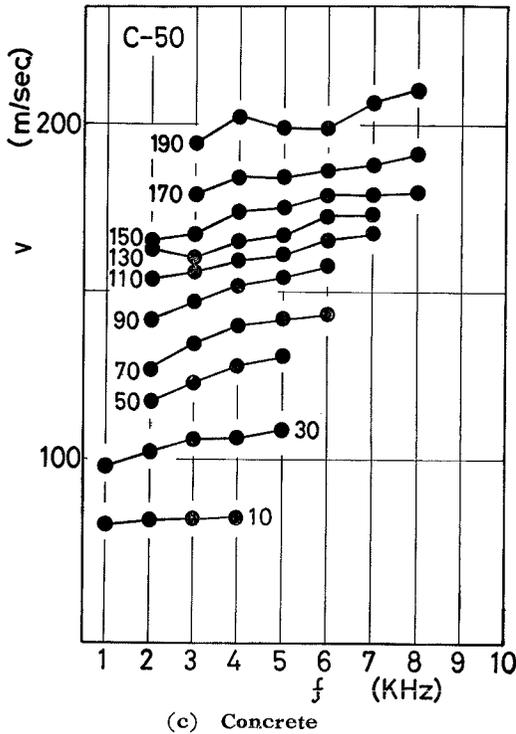


Fig. 3 Relationships between v and f

スト、モルタル、コンクリートの試料について波動の伝播速度と周波数との関係を示す（図中の数字は測定時間を示す）。これらの図から各試料とも周波数が高くなるに従い伝播速度が若干増加する傾向が認められる。さらにこの傾向は注水後の時間の経過とともに大きくなる。この経時変化を水セメント比の影響も含めてさらに詳しく考察するために、幅広く測定が可能であった5 KHzの周波数における伝播速度と時間の関係を概略的に示したのが Fig. 4 である。いずれの試料も時間がたつにしたがって伝播速度が速くなるが、測定時間が60分以内においては試料による伝播速度の差はほとんどみられない。それ以後、伝播速度の増加割合はペースト、モルタル、コンクリートの順に大きくなり、ペーストでは水セメント比の小さいものほど著しい。またモルタルの場合は水セメント比による差はほとんど認められず、コンクリートの場合はペーストと同様の傾向がわずかにみられるが、それはペーストの場合と比較してきわめてわずかである。

また周波数の増加による伝播速度の増加の傾向は、同

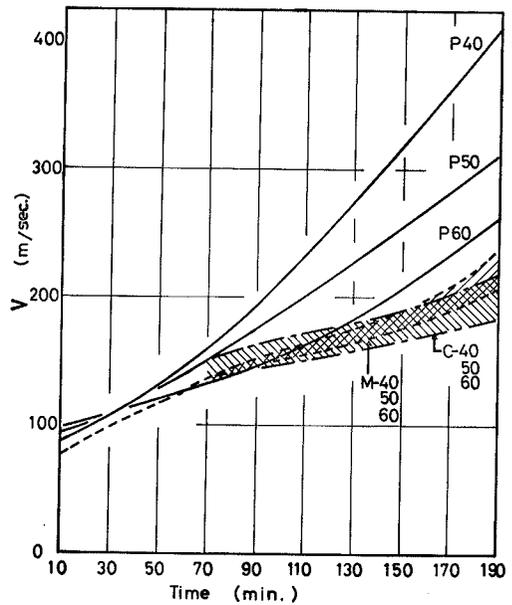


Fig. 4 Relationships between v and time

じ測定時間においては試料の配合条件にかかわらず同程度になっており、伝播速度は試料のマトリックス層の硬化の程度、すなわちマトリックス層のセメント量の多少による硬化の程度の違いによって支配されているものと推察される。

4.4.2 減衰定数

減衰定数と周波数あるいは経過時間との関係は、各試料における減衰定数の測定可能範囲がせまく、全体として明確な傾向をつかむことは困難であった。Fig. 5 にペーストの水セメント比 50% のものについて減衰定数と周波数の関係を示す。この図によれば、測定の初期においては、減衰定数は周波数が高くなるにつれて直線的に増加しており、高い周波数の波動ほど減衰が大きいことを示している。さらに時間が経過し、測定時間が110分以上になると、減衰定数～周波数関係は下に凸の曲線となり、4～6 KHzあたりの周波数の波動が減衰が少なく、伝わりやすいことを示している。いいかえれば、測定時間の初期段階では、試料中を比較的低い周波数の波動が伝わりやすいが、時間の経過とともに、すなわち硬化が進行するにつれて高い周波数の波動も伝わりやすくなる。

4.4.3 ざり粘性率、体積弾性率および遅延時間

周波数 5 KHz において測定した伝播速度と減速定数

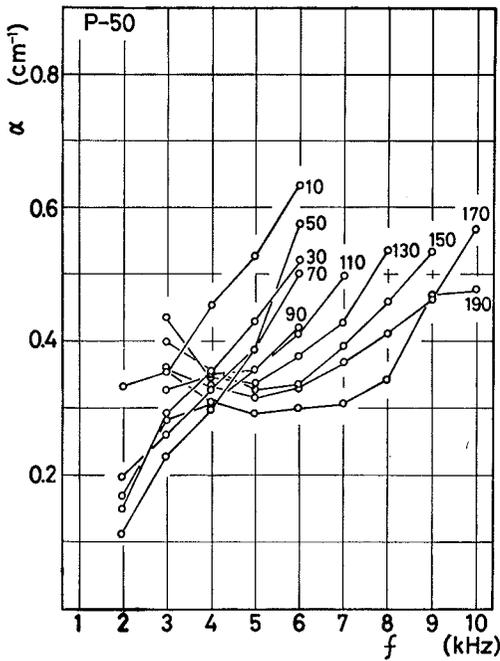


Fig. 5 Relationships between α and f

から式 (1), (2), (3) を用いて求めたずり粘性率 (η), 体積弾性率 (K), 遅延時間 (τ), と経過時間の関係の概略をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 に示す。

ずり粘性率については, Fig. 6 から明らかなように時間の経過とともにずり粘性率は大きくなるが, その様相はペースト, モルタル, コンクリートによってかなり異なる。すなわちペーストの場合, 時間の経過とともにずり粘性率は急激に増加し, 水セメント比の小さいものほどその増加割合が大きい。モルタルの場合には, 初期の増加割合はペーストとほぼ同様であるが, 経過時間が90~110分以後はペーストほど増加割合が急激でなく, $\log \eta$ ~経過時間曲線はねてくる。コンクリートになると, この傾向がさらに顕著となり, 経過時間30~50分までのずり粘性率はペーストよりむしろ大きい, それ以後の増加率はペースト, さらにモルタルと比較して急激に小さくなる。モルタル, コンクリートについての水セメント比の影響はペーストの場合と同様の傾向がみられるが, ペーストほど顕著ではない。

次に体積弾性率の経時変化に対する関係は, 先のずり粘性率と経時変化の関係と比較的同じような傾向を示し

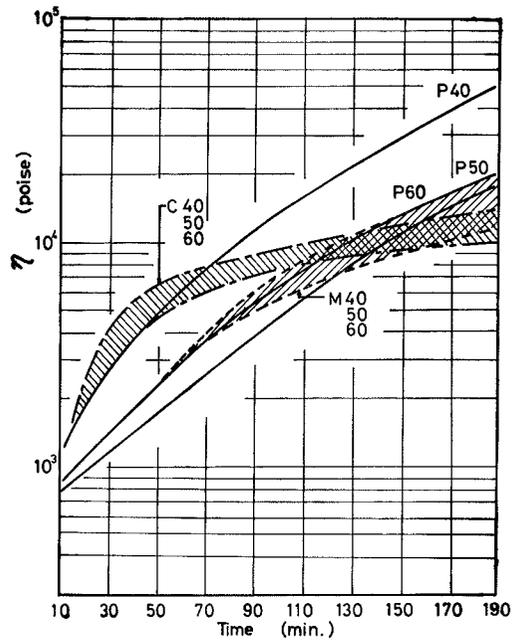


Fig. 6 Relationships between η and time

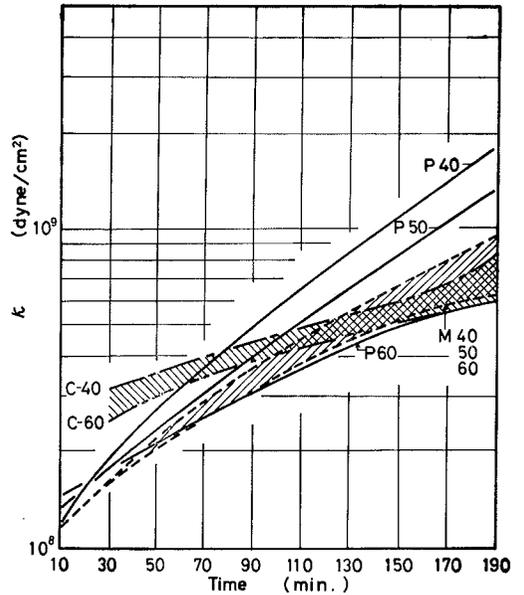


Fig. 7 Relationships between K and time

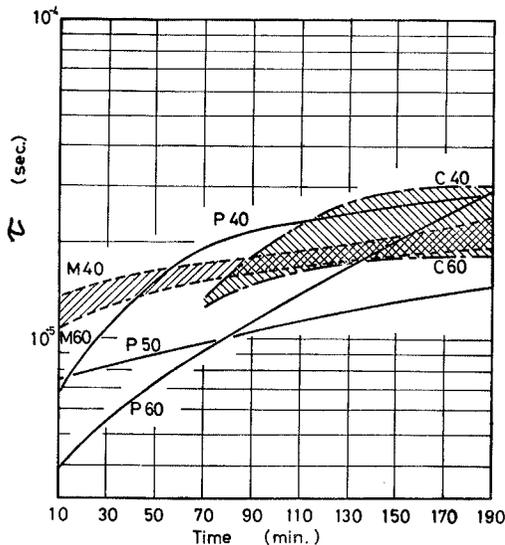


Fig. 8 Relationships between τ and time

ているが、ペーストの水セメント比の差による影響が一段と顕著になっている。

遅延時間と経過時間の関係によると、一般的にみて時間が経過すると、遅延時間が増加する傾向にあり、コンクリートの場合には、その増加程度が水セメント比の影響をかなり大きく受けているようである。しかし要因別の変動が大きく、本実験からそれ以上の顕著な傾向を認めることは困難である。

5. 結 語

本研究は、試作した電氣的に振動を制御する波動伝播測定器を用いて、フレッシュペースト、モルタルおよびコンクリート中の波動伝播特性を測定し、各種レオロジー特性値を求め、主としてその経時変化について検討を加えたものである。

以下に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) 試料中の波動伝播速度は、周波数が高くなるに従い若干大きくなる。この傾向は注水後時間の経過とともに大きくなる。

(2) 伝播速度は時間の経過とともに速くなるが、注水初期においては各種要因による差は少なく、時間がたつに従って、ペースト、モルタル、コンクリートの順に大きくなり、ペーストでは水セメント比の小さいものほ

ど大きくなる。

(3) 減衰定数の測定結果によれば、注水初期において試料中を比較的低い周波数の波動が伝わりやすいが、時間の経過とともに高い周波数の波動もよく伝えるようになる傾向がみられる。

(4) ずり粘性率は時間の経過とともに大きくなり、その増加割合はペーストがもっとも大きく、ついでモルタル、コンクリートの順になっており、時間がたつにつれてその差は大きくなる。また水セメント比が小さいものほど増加割合が急激である。

(5) 体積弾性率の経時変化の様子はずり粘性率の場合と比較的類似している。

(6) 遅延時間と経過時間の関係から、全般的にみて、時間が経過すると、遅延時間が増加する傾向にある。

今回試作した測定装置は、従来の超音波法および打撃式伝播法の中間の周波数領域、すなわち超音波と可聴音域にわたってフレッシュコンクリートのレオロジー特性値を把握するために有効であり、またフレッシュコンクリートの凝結、硬化の過程を含めたレオロジー特性の経時変化を把握していくにも有効な測定装置のひとつであると考えられる。

なお、本実験を行うに当って、鳥取大学工学部土木工学科材料研究室の諸氏に多大の協力を賜った。紙面をかりて、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 西林新蔵；フレッシュコンクリートの性質—レオロジーのアプローチ，「材料」，第24巻，第260号，1975年
- 2) 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—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」，第24巻，第260号，1975年
- 3) 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—三軸圧縮試験による考察—，土木学会第29回年次学術講演会概要集，第5部，1974年10月
- 4) 藤田，西林，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—三軸圧縮試験による考察—，土木学会第33回年次学術講演会概要集，第5部，1978年9月

- 5) Nishibayashi, Kiyama, Sakata ; The Fundamental Study on the Rheological Properties of Fresh Concrete-The Propagation Characteristics under the Ultrasonic Transmitted-, 鳥取大学工学部研究報告, 第6巻, pp. 109~125, 1975年.
- 6) 西林, 木山, 阪田, 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—モルタルの弾性波伝播特性について—, 鳥取大学工学部研究報告, 第7巻, pp. 64~74, 1976年.