

## 1. はじめに

コンクリートの非破壊試験法としての超音波伝播速度法は、手軽さ及び品質推定の精度の面で他の方法に比して有利であり、国内、国外を問わず多くの研究報告が見られるが、実施構造物を対象にしようとする、コンクリート部材の内部条件（鉄筋等埋入物、空隙量、含水分、キレツ）の影響に関しては必ずしも適切なレスポンスを示さない事がある。これは相対するコンクリート面に設置した端子間を伝播した最初の音波によって内部品質を判定するという測定のアigorリズムに起因するもので、この方法では終始つきまとう問題である。

然しながら、実用上は、これら内部条件の変化に対し測定値がどのような応答をするのか、その限界は、及び測定値の補正が出来るとすればどうするのか、といった測定上の及びデータ解析上の諸点を明確にする事が極めて重要な事項である。その為にはコンクリートをモルタル、粗骨材、空隙（或いは水隙）、鉄筋といった多相の複合材と考え、音波の伝播径路を把える事が望ましいが、その性質上、決定論的に解析する事は困難が多く、アプローチとしては考えられる種々の径路を伝播するのに要する時間を計算上求め、実測値及びオシロスコープ上の受信波形の状態から比較分析し、近似するといった方法に頼らざるを得ない。

又、他方で、超音波伝播速度（以下縦波速度）はその性質上コンクリートの動的ヤング率には極めて密接な関連があるが、塑性的性質は殆んどパラメータとして関連してこない故に、例えば圧縮強さ等との関連には避けられない誤差が含まれる事になる。その為にはコンクリートに与えた振動の減衰定数を含めて分析する事が望ましいが、現在の市販の試験機では対象が標準試験体に限定される故に躯体構造物への適用に当たっての極めて基礎的な事項について殆んど明らかにされていない。

本報告はこれら諸問題を背景として実施した幾くつかの実験室実験の結果を紹介し、非破壊試験法としての動的方法の適用の際の諸要因の効果を明確化しようとするもので、実験内容は既に何度かに亘って日本建築学会へ報告したものに、更に新たに行った実験の結果を含めてとりまとめたものである。

## 2. 実験の進め方

## 2-1. 実験の条件

実験は全体を各々の目的に沿って3シリーズに分けて実施した。各々のシリーズの目的、材料、調査及び供試体等諸条件は以下の表-1の如くである。なお、実験主旨の（）内に示したNo.は実験の詳細について報告した引用文献である。

表 - 1 実験の概要

| シリーズ | 実験の主旨                                       | 使用材料                                  | 調合条件                                                             | その他測定条件                                       |
|------|---------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1    | コンクリートをモルタルと粗骨材の2相複合材と考えた時の縦波速度の分析（文献1）     | O.P.C.* 豊浦標準砂<br>北上川川砂 安山岩碎石<br>石灰岩碎石 | 水セメント比 60%<br>単位水量 210kg/m <sup>3</sup><br>細骨材率 40.0%            | 円柱供試体（φ10×20cm）粗骨材の性質を把握し、特にモルタルとの界面の効果を推定する。 |
| 2    | コンクリート中の内部損傷（載荷履歴による内部クラック）が縦波速度に及ぼす影響（文献2） | O.P.C.<br>北上川川砂<br>石灰岩碎石              | 水セメント比 60%<br>単位水量 226kg/m <sup>3</sup><br>細骨材率 45.2%            | 円柱供試体に載荷履歴を与え、その前後の特性値の比較、断面観察によるクラックの定量化。    |
| 3    | 振動の減衰定数に及ぼす測定条件の効果、特に試験体の形状寸法の効果            | O.P.C.<br>相模川川砂<br>相模川川砂利             | 水セメント比 55.65%<br>単位水量 (g/m <sup>3</sup> ) 175.195<br>細骨材率 39.42% | 円柱供試体、角柱試験体、平板試験体についての共振周波数、減衰定数の測定。          |

\* O.P.C. : 普通ポルトランドセメント

## 2-2. 使用試験器及び測定法

縦波速度の測定は市販の測定器で、使用した周波数は主に 100KHz、参考の為に 20~400KHz の周波数のチェックを行ったが、波形が乱れない範囲で出来るだけ高周波とした。振動の減衰特性の測定器は、原型は(株) K 社製 KH711 型共振法ヤング率測定器であるが、入出力の増巾の為の手直しを行い、又構造躯体の測定の目的で振動テーブルの代りに音響スピーカ (10cmフルレンジ型) を用い、測定の精度向上と用途の高範囲化を意図した。減衰定数は自由支持の供試体に、①スピーカより可変周波数の音波を出力して②共振周波数を求め、③ピックアップでの受信波の振巾を 100 (%)とし、④スピーカからの出力を継続音とした時の振巾の減衰状態を確認し、⑤並行して受信波の写真分析を行う。

## 3. 実験結果及びその分析

### 3-1. 複合材としての縦波速度の分析

(1)表-2 は細骨石石質、粗骨材の寸法及び石質、養生種別毎に測定結果をまとめ、表-3 はその分散分析の結果を示したものであるが、明らかに粗骨材石質の影響が著しいが、縦波速度にはこれ以外にも粗骨材粒径の効果が有り、複合材としてのアプローチが有効である事が解る。又ここには掲げなかったがモルタル中に石塊を埋め込んだモデル試験体の測定では大略、両者の性質の和として縦波速度の分析が出来るが、誤差項として考えた界面の影響も少なくないという結果を示している。

(2)表-3 中で、粗骨材の寸法、即ち 25mm, 15mm 間の比較を見ると、前者は後者に対し 80~200 (m/sec) 比率では平均で 3~4 % 速度減を示している。そこで砕石粗骨材を立方体と仮定し、平均粒径  $\bar{d} = \sqrt{d_n \cdot d_{n-1}}$  からコンクリート中の粗骨材の持つ表面積を計算すると表-4 の如く、25mm 粗骨材で 1460m<sup>2</sup>、15mm粗骨材で 2005m<sup>2</sup> となり、その比率は 1.373 つまり約 37 % の増加である。

100 KHz の発振子を用いた場合のコンクリート中での波長は、この場合約 4.5 cm であり、10~25mm 骨材の界面が音速に如何なる影響を与えているかを説明する為にはもう少し検討を重ねる必要があるが、見掛け上の結果としては、粗骨材の表面積の増加によって縦波速度は減少し、その比率は大略 10:1 程度である事が解った。

圧縮強度と縦波速度との関連については、今回の実験では対象とした要因の数に対して観測値の数が少ない為に適

切な関係は得られなかったが、これはむしろ縦波速度は圧縮強度よりもコンクリートの内部条件に敏感である故と思われる。

(3)なお、養生 3 法の差による影響は、セメントの水和程度という問題の他に、測定時の試験体の含水

率も大きな効果を示す。縦波速度への影響は、含水率差が 2~3 % と考えると 180~270m/sec となり<sup>\*3</sup>、表-2 中の実測値の大よその説明が出来る。更にここには示さなかったが、同シリーズの実験から、吸水性の大きい粗骨材を用いたコンクリートではその空隙 (或いは水隙) に相当する部分にモルタルが浸透・置換されたと考えた方が実測値に近似する事が解った。

表-2 実験結果

| 試 | 寸  | 養生 | 強度                 | 縦波   | 比重   | 動ヤ   | ヤ    |
|---|----|----|--------------------|------|------|------|------|
| 体 | 法  | 種  | kg/cm <sup>2</sup> | m/s  |      | ング率  | ング率  |
| 1 | 25 | 水  | 204                | 4626 | 2.32 | 3.23 | 2.05 |
| 2 | 25 | 砂  | 174                | 4402 | 2.32 | 3.15 | 2.12 |
| 3 | 25 | 石  | 236                | 4819 | 2.37 | 3.74 | 2.46 |
| 4 | 25 | 砂  | 185                | 4567 | 2.36 | 3.57 | 2.62 |
| 5 | 15 | 水  | 249                | 4442 | 2.31 | 3.30 | 1.83 |
| 6 | 15 | 砂  | 203                | 4373 | 2.31 | 3.19 | 2.34 |
| 7 | 15 | 石  | 236                | 4725 | 2.35 | 3.55 | 3.13 |
| 8 | 15 | 砂  | 179                | 4525 | 2.35 | 3.44 | 2.64 |
| 1 | 25 | 水  | 280                | 4393 | 2.34 | 3.26 | 2.50 |
| 2 | 25 | 砂  | 239                | 4439 | 2.34 | 3.16 | 2.03 |
| 3 | 25 | 石  | 264                | 4737 | 2.39 | 3.66 | 2.80 |
| 4 | 25 | 砂  | 224                | 4695 | 2.39 | 3.54 | 2.67 |
| 5 | 15 | 水  | 307                | 4373 | 2.34 | 3.29 | 2.21 |
| 6 | 15 | 砂  | 249                | 4207 | 2.34 | 3.20 | 2.34 |
| 7 | 15 | 石  | 317                | 4486 | 2.38 | 3.62 | 2.70 |
| 8 | 15 | 砂  | 254                | 4435 | 2.39 | 3.49 | 2.94 |

動ヤング率, ヤング率  $\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$

表-3 分散分析

|        | 圧縮 | 縦波 | 動    |        |
|--------|----|----|------|--------|
|        | 強度 | 速度 | ヤング率 | * ヤング率 |
| 養生     | 水  | 砂  | 水    | 砂      |
| 砂質     | ◎  | ○  |      |        |
| 寸法     | ○  | ○  | ◎    |        |
| 石質     |    | ◎  | ◎    | ◎      |
| 砂 X 寸法 |    |    | ◎    |        |

◎ 高度に有意 ○ 有意  
\*  $1/3 P_{\max}$  関係係数

表-4 骨材の表面積

| 石質  | 寸法<br>mm | 平均<br>mm | 平均容積<br>m <sup>3</sup> | 平均表面積<br>m <sup>2</sup> | 容積 (m <sup>3</sup> /m) |       | 個数 (個) |        | 表面積 (m <sup>2</sup> ) |      |
|-----|----------|----------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------|--------|--------|-----------------------|------|
|     |          |          |                        |                         | 割合 1                   | 割合 2  | 割合 1   | 割合 2   | 割合 1                  | 割合 2 |
| 安山岩 | 25~20    | 22       | 10648                  | 2904                    | 0.0776                 | —     | 7.29   | —      | 212                   | —    |
|     | 20~15    | 17       | 4913                   | 1734                    | 0.2515                 | —     | 51.19  | —      | 888                   | —    |
|     | 15~10    | 12       | 1728                   | 864                     | 0.0719                 | 0.401 | 41.61  | 232.06 | 360                   | 2005 |
|     | 計        | —        | —                      | —                       | 0.401                  | 0.401 | 100.09 | 232.06 | 1460                  | 2005 |
| 石灰岩 | 25~20    | 22       | 10648                  | 2904                    | 0.0771                 | —     | 7.24   | —      | 210                   | —    |
|     | 20~15    | 17       | 4913                   | 1734                    | 0.2520                 | —     | 51.29  | —      | 889                   | —    |
|     | 15~10    | 12       | 1728                   | 864                     | 0.0719                 | 0.401 | 41.61  | 232.06 | 360                   | 2005 |
|     | 計        | —        | —                      | —                       | 0.401                  | 0.401 | 100.09 | 232.06 | 1460                  | 2005 |

### 3-2. コンクリートの内部クラックが縦波速度に及ぼす影響

(1) 測定法は最大荷重、及びその90%、70%、50%、30%、0%（無荷重）の荷重履歴を与えた円柱供試体に対し、荷重前後の縦波速度をチェックし、更に断面を切断・研摩しクラックの観察を行ったものである。クラックはモルタル中のモルタルクラックと粗骨材-モルタル界面のボンドクラックに分け、各々の合計長さとして表示し、又同様に測定対象面に現られる骨材の中で全周長が1mmを超えるものを粗骨材として、その周長を実測・合計した。測定結果は次頁の図-1に、各荷重レベルに対し、対象断面積A、骨材周長計 $l_a$ に対するモルタルクラック長 $l_m$ 、ボンドクラック長 $l_b$ の比率として示した。図から見られる様にボンドクラックは荷重前から相当量存在し、荷重の増加に従って2次曲線的に増加する事、モルタルクラックは、今回の実験では荷重レベルが70%で始めて観察され、その荷重の増加に従い、極めて急速な増加傾向を示す事が解った。又同図中には縦波速度の荷重前後の比率も併せて示したがキレツ量とは全く逆の関係が見られる。

(2) 次に縦波速度の荷重前後比に対するクラック量の関係を見ると図-2の如くで、図中①と②は殆んど同様な意味の曲線であるが、両者ともに荷重レベルが0-30%、30-50%、及び50%以上の大きく3段階に分けると各々の傾向が異なっている事が解る。これはクラックの発生・進展

の状況と照らし合わせて考えると、④荷重初期では粗骨材下端の潜在クラックがその界面に沿って発達し、縦波の伝播径

路に影響を与える為に見掛けの速度が小さくなると考えられる。⑤一方荷重中期には発達を始めたクラックが骨材の側面（荷重軸方向）に沿って進展を始める為縦波の伝播径路にはそれ程大きな影響を与えないものと推定される。⑥次に、荷重後期ではモルタルクラックが次第に発生が始めるが、これは剪断方向、即ち、縦波の伝播方向に対して斜めに入る為、それ以後の速度とクラック

量との関係はほぼ直線的になると考えられる。

⑦結局同図はクラックの発生・進展方向を含めて考察する事によって説明が可能となるが、この場合も、個々のクラック長は大体1~10mmであり、4.5cmの波長の音波の伝播にどんな影響を与えるかは更に検討の要がある。

⑧図中、③の曲線はモルタルクラックの縦波速度への影響を示しているが、ボンドクラックの場合に比して傾き、即ちその影響度が小さいのは進展の角度の影響の他に、後者はモルタルと粗骨材間の付着力に直接関係する因子である為と思われる。

3) 図-3は観測値の全体を縦波速度の荷重前後比とボンドクラック量との関係をプロットしたものであるが、両者間に相当密接な関連を見出す事が出来た。

### 3-3. コンクリートの振動特性に関する実験

(1) 測定法は次頁の写真に示す様に自由支持の供試体を与えた音波振動に対する供試体のレスポンスとして共振周波数及び基準振巾の1/2振巾になるまでのサイクル数Nを特性とした。実験室内気中で養生した材令1週及び4週の $\phi 10 \times 20$  cmの円柱供試体に関する測定結果を

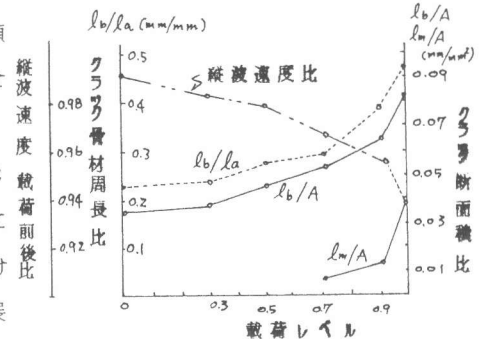


図-1 クラックの発生進展

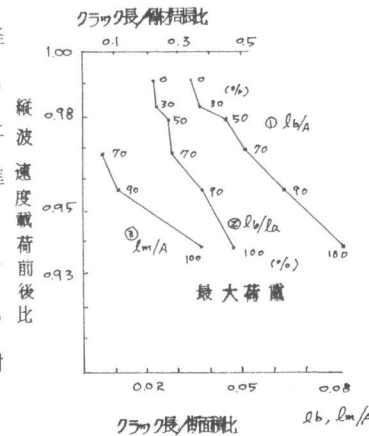


図-2 縦波速度の変化

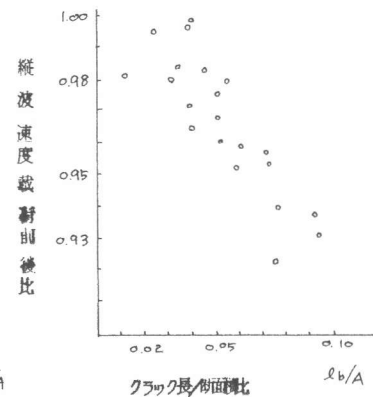


図-3 縦波速度クラック散布図

表-5 水セメント比材令と振動特性

| 材令 | 水セメント比 | N <sub>0</sub> | 動ヤング率<br>$\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ | 圧縮強度<br>$\text{kg/cm}^2$ | カウンタ<br>N | 写真断<br>N | 減衰係数<br>D * |
|----|--------|----------------|----------------------------------------|--------------------------|-----------|----------|-------------|
| 1  | 55     | 1              | 2.28                                   | 165                      | 14        | 12       | 0.050       |
|    |        | 2              | 2.33                                   | 163                      | 12        | 10       | 0.058       |
|    |        | 3              | 2.31                                   | 167                      | 13        | 12       | 0.053       |
| W  | 65     | 1              | 2.13                                   | 117                      | 12        | 11       | 0.058       |
|    |        | 2              | 2.17                                   | 118                      | 9         | 9        | 0.077       |
|    |        | 3              | 2.29                                   | 121                      | 10        | 8        | 0.069       |
| 4  | 55     | 1              | 2.36                                   | 242                      | 10        | 9        | 0.058       |
|    |        | 2              | 2.55                                   | 231                      | 14        | 13       | 0.050       |
|    |        | 3              | 2.50                                   | 231                      | 8         | 8        | 0.087       |
| W  | 65     | 1              | 2.28                                   | 186                      | 17        | 15       | 0.041       |
|    |        | 2              | 2.45                                   | 195                      | 12        | 11       | 0.058       |
|    |        | 3              | 2.35                                   | 189                      | 17        | 17       | 0.041       |

\*  $D = 0.69315/N$

表-5に示した。振動の減衰定数はその物体内で吸収さ

れるエネルギー量を示すパラメータであり、一般的にはモルタルよりコンクリートの方が、高強度より低強度の方が大きな減衰状態に示す事が知られている。同表で見られる傾向は、水セメント比が65%から55%へ、材令が1週から4週へと圧縮強度、動弾性係数が大きくなっているのは当然であるが、対数減衰率は傾向としては減少していると考えられるが、相当に大きなバラツキを示している。

(2)次に、供試体の形状、寸法の効果を探る為に円柱供試体、角柱供試体及び平板供試体につき種々寸法を変化させて測定を行い、その結果を表-6に示した。表中で測定値

がない箇所は測定不可能及び、適切な計算式がないものである。測定結果から、共振周波数は試験体の大きさに全く反比例している事は説明するまでもないが、対数減衰率も大よそ試験体の大きさに反比例の傾向が見られる。この傾向は、もう少し実験を重ねた上で明確化したいと考えているが、少なくとも、試験体の寸法・形状係数を含めて考える必要がある事は明らかである。

(3)測定値のバラツキの大きな原因は、測定時に於ける供試体の

支持方法、ピックアップの取り付け方、スピーカと供試体との間隔、等が大きく、これらの影響度はオシロスコープの波形の観察によってある程度は把握出来る。特に標準外の供試体や支持法が異なる場合にはデジタルカウンターの値よりも受信波の状態の方が十分に信頼のおける結果を示す事が多かった。

#### 4. まとめ

以上の諸実験及びその結果の検討から明らかになった事柄及び今後の課題は以下である。

(1)コンクリート中の縦波の伝播状態は、媒質をモルタル、粗骨材及びその両者の界面の3要因から大よその説明が可能である。関連実験を更に推し進めれば圧縮強度だけでなくもう少し広義な品質推定が高精度で行える可能性もあるが、その場合に、使用骨材の石質、粒径毎に補正係数を準備する方向での検討が必要である。また、モルタル中の空隙や含水分等の要因効果の検討も併せて行う必要がある。

(2)コンクリート内部のクラックも縦波速度には少なからぬ影響を及ぼす。(1)の問題とも関連するが、モルタル中のクラックよりも粗骨材界面のクラックの影響の方がより大であるが、これはクラックの方向性が縦波速度に及ぼす影響の他に、より剛性の大きい粗骨材がモルタルと切り離される事も理由の1つと考えられる。これらの実験結果から、少なくとも圧縮強度よりは縦波速度の方がコンクリートの内部条件には敏感であると考えられるが、それ故に種々の要因が未知である場合には測定値のバラツキが大きくなってしまいう例が多いが、出来れば健全試験体との相対比較的な適用法が効果的であると思われる。

(3)コンクリートの内部状態を把握する目的では、縦波速度よりも振動の減衰定数の方がより適切であると考えられているが、今回の実験では傾向としては把握されるが、測定値のバラツキが大きい為に明確な結論は得られなかった。これは測定法に幾くつかの温暖点があったと思われるが、むしろ測定器をアナログ的な表示にした方が当初は望ましいと考えている。

表-6 形状効果と振動特性

| 条 件                             |     | 共振周波数<br>Hz         | 動弾性係数<br>$\times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ | 対数減衰率 |
|---------------------------------|-----|---------------------|----------------------------------------|-------|
| 円柱<br>$\phi 10 \times h$        | 径   | 2                   | 8831                                   | 3.01  |
|                                 | 高さ  | 3                   | 5385                                   | 2.58  |
|                                 | 寸法  | 4                   | 4339                                   | 2.89  |
|                                 | 高さ比 | $\phi 15 \times 30$ | 5805                                   | 2.92  |
| 板<br>$t=10$                     | 寸法  | 24.1×34.1           | 4702                                   | —     |
|                                 | 寸法  | 28.3×40             | 5924                                   | —     |
|                                 | 寸法  | 40×56.6             | 3484                                   | —     |
| 角柱<br>$(15 \times 15) \times h$ | 高さ  | 1 (13.2)            | 12830                                  | 2.855 |
|                                 | 高さ  | 2 (26.5)            | 6412                                   | 2.85  |
|                                 | 高さ  | 4 (53.0)            | 3263                                   | 2.855 |



写真-1

文 献 \* 1 昭和51年建築学会関東支部研究報告

\* 2 同,昭和53年

\* 3 昭和53年セメント技術年報