

## 衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定方法に関する基礎的研究

—コンクリートの使用材料および調合の違いが弾性波速度に及ぼす影響—

### STUDY ON METHOD FOR ESTIMATING COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE BY IMPACT-ELASTIC WAVE

—Influence of variations of concrete materials and mix proportions on elastic wave velocity—

立見 栄司\*, 中田 善久\*\*, 河谷 史郎\*\*\*

*Eiji TATSUMI, Yoshihisa NAKATA and Shiro KAWATANI*

This paper describes a nondestructive inspection method for estimating compressive strength of concrete using velocity of impact-elastic wave, and explains influence of variations of concrete materials and mix proportions on relation between the velocity and the strength for improving the accuracy of estimation. First, we survey the recent studies about methods to measure velocity of impact-elastic wave and relations between the velocity and compressive strength. Next, experiments to clear influential factors on the velocity, such as W/C, slump, bulk volume of coarse aggregate and cement type, were carried out using cylinder specimens. The results to describe influence of the four factors on relation between elastic wave velocity and compressive strength were presented. Finally, an appropriate estimating formula was given by fitting to the experimental relation.

**Keywords:** Concrete, Nondestructive inspection, Impact-elastic wave, Elastic wave velocity, Compressive strength, Mix proportion

コンクリート、非破壊検査、衝撃弾性波、弾性波速度、圧縮強度、調合

#### 1. はじめに

一般的なコンクリート構造物の非破壊検査法による強度推定方法として、反発度法、超音波法<sup>1),2),3)</sup>およびそれらの複合法<sup>2)</sup>が知られているが、近年、衝撃弾性波法<sup>4)</sup>、電磁レーダ法<sup>3)</sup>などによる方法が研究されている。この中で、反発度法は、シュミットハンマーあるいはテストハンマーと呼ばれ、最も簡便な強度試験器として広く普及しており、多くの研究者により個々の強度推定式<sup>5)</sup>が提示されている。また、超音波法は、超音波の減衰を少なくするために、センサーとの接触面を滑らかにして密着性を高め、かつグリース等の接触媒質を塗る必要があり、実用面でやや簡便性に欠けるものと思われる。さらに、衝撃弾性波法は、測定法が比較的簡単であり、衝撃による入力エネルギーが大きいので測定領域が比較的に広い、圧縮強度の推定の他に多岐に渡る検査用途に利用されつつある。例えば、PCグラウトの充填性評価<sup>6)</sup>、コンクリートの厚さ測定<sup>7)</sup>、コンクリート中の欠陥・空隙評価<sup>8),9)</sup>およびコンクリート杭の健全性評価<sup>10)</sup>などがある。

本研究で対象とする衝撃弾性波による圧縮強度推定方法は、強度を測定する部分に振動検出器を当て、その近傍をハンマーで軽く叩くという極めて簡便な方法<sup>11)</sup>により即座に圧縮強度を取得できる

ことが特徴である。一般に、弾性波がコンクリートを伝播する速度（以下、弾性波速度とする）は、1つの振動センサーにより粗密波の多重反射波を測定し反射波の振動数から求める方法（反射波法）および2つの振動センサーにより2点間の波動到達時間差から求める方法（位相法）があり、コンクリートの強度を測定するいろいろな部位や形状に応じていずれかの方法により求めることができる。また、衝撃弾性波による圧縮強度の推定方法は、比較的最近の研究であるため、特に、超音波速度に及ぼす影響要因については多くの研究<sup>12),13),14)</sup>があるものの、弾性波速度に及ぼす影響要因に対する系統的な研究は極めて少ない。

そこで、本推定方法が弾性波速度と圧縮強度との関係から圧縮強度を推定するため、コンクリートの各種要因が弾性波速度に及ぼす影響について基礎的な実験研究<sup>15)</sup>を行った。本論文は、弾性波速度に影響を及ぼす要因を使用材料による要因、調合による要因および試験体による要因に大別し、その中で、使用材料による要因および調合による要因に主要なセメントの種類、水セメント比、スランプおよび粗骨材のかさ容積の違いが弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響について実験研究したものである。

\* 三井住友建設(株)技術研究所 主席研究員・工修  
\*\* ものつくり大学建設技能工学学科 講師・博士(工学)  
\*\*\* ものつくり大学建設技能工学学科 教授・博士(工学)

Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd. Technical Research Institute, M. Eng.  
Lecturer, Monotsukuri Institute of Technologists, Dr. Eng.  
Prof., Monotsukuri Institute of Technologists, Dr. Eng.

2. 弾性波速度の測定方法および弾性波速度と圧縮強度との関係

本研究で扱う衝撃弾性波によるコンクリートの圧縮強度推定方法は、コンクリート表面に振動検出器を接触させ、その近傍をハンマーで軽く叩いて衝撃弾性波を発生させ、表層部を伝わる弾性波伝播速度を測定し、弾性波速度と圧縮強度との相関関係から非破壊的に圧縮強度を求める方法である。このため、本研究において、弾性波速度の測定方法および弾性波速度と圧縮強度との関係が非常に重要な要素である。

2.1 弾性波速度の測定方法

衝撃弾性波による圧縮強度推定方法に関する研究は比較的新しく、したがって、研究の数もかなり限られている。既往の研究による弾性波速度の測定方法および特徴を表1に示す。弾性波速度測定方法には大別して反射波法<sup>16),4),7),17)</sup>と位相法<sup>4),11),18)</sup>がある。

(1) 反射波法

反射波法は、図1に示すように、2つの平行面から成る部材の一方の面を垂直に打撃して発生させた粗密波の多重反射波を測定し、その周波数スペクトルから反射波の振動数を抽出することにより弾性波速度を求める方法である。この方法はインパクトエコー法<sup>16)</sup>として多くの研究で用いられている。インパクトエコー法は多重反射に基づくため、反射面間の距離(厚さ・長さ)が長くなると波動の減衰により多重反射波が測定できなくなる。そのため、一般的に測定範囲の上限は5~10mとされるが、下限の制約は実用上ない。また、この方法で最も重要な点は、多重反射波の周波数スペクトルから如何にして粗密波の反射振動数を特定するかである。円柱供試体のように単純で一定形状の部材(単純部材)の場合は殆んど問題ないが、一般の構造体の部位(構造部位)では表面波や他の反射波によるスペクトル成分が現れ、反射振動数の判別に困難を伴う場合がある。そこで、参考文献7)では、表面波の影響を排除するために、

表1 既往の研究による弾性波速度の測定方法および特徴

| 測定法                              | センサー数 | 測定対象     | 測定物理量    | 測定範囲(m)     | 速度算出の自動化         |
|----------------------------------|-------|----------|----------|-------------|------------------|
| (1)反射波法 <sup>16),4),7),17)</sup> | 1     | 粗密波の多重反射 | 反射波の振動数  | 上限: 5~10    | 構造部位 ×<br>単純部材 ○ |
| (2)位相法 <sup>4),11),18)</sup>     | 2     | 粗密波の位相速度 | 2点間の伝播時間 | 下限: 0.3~0.5 | ○                |

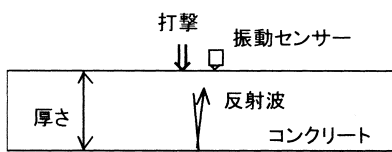


図1 反射波法による弾性波速度の測定方法

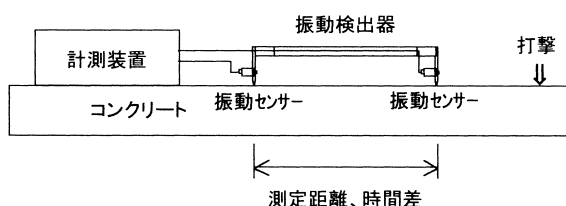


図2 位相法による弾性波速度の測定方法

質量の異なる多種鋼球により打撃した結果から粗密波の反射振動数を判別している。このように、インパクトエコー法は一般の構造部位に適用する場合、検討しなければならない数多の要素がある。

(2) 位相法

位相法は、コンクリートを伝播する粗密波の位相速度を求める方法であり、2つの振動センサーを所定の間隔で配置し、その近傍を打撃して発生させた弾性波の2点間の伝播時間から弾性波速度を算定する。このため、測定範囲としては、2つの振動センサーを配置する間隔(測定距離)および打撃点までの距離が必要となるので、下限は30~50cmとなるが、上限は特には制約されない。なお、参考文献18)では、鋼球に一方の振動センサーを取り付け、打撃波形を直接測定している。位相法では、波動の立上り時間を閾値法などにより確定すれば、弾性波の2点間伝播時間は容易に算定され、弾性波速度は自動的に算出される。本研究では構造体コンクリートの弾性波速度を容易に測定するため、図2に測定方法を示すように、2つの振動センサーを所定の間隔で取っ手状の治具に固定した「振動検出器」を用いている。これにより、2点の弾性波を片手で容易に測定でき、推定強度をリアルタイムに取得することができる。

2.2 弾性波速度と圧縮強度との関係

弾性波速度と圧縮強度との関係について、参考文献4)では、円柱供試体、ボス供試体および壁のコア供試体を用いて、粗骨材の最大寸法(25, 40mm)、供試体寸法(φ100×200, φ125×250mm)および養生方法(湿布、水中/気中)に関する実験を行い、材質や養生方法が多少異なっても往復弾性波速度から強度を推定することを可能としている。一方、参考文献17)では、弾性波速度と圧縮強度との関係は、コンクリートの調合、養生方法などによって変化することから、粗骨材の最大寸法、スランプ、水セメント比、細骨材率、供試体寸法および養生方法についての実験を行い、調合および養生方法が弾性波速度と圧縮強度との関係に影響を及ぼすことを指摘している。しかしながら、現状では衝撃弾性波の伝播速度に及ぼす影響要因に関する系統的な研究はほとんど見られない。本推定方法は、測定により求めたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との相関関係から圧縮強度を求める方法である。したがって、推定精度および信頼性を高めるために、弾性波速度に影響を及ぼすコンクリートの各種要因ごとに弾性波速度と圧縮強度との関係を予め調べておく必要がある。弾性波速度に影響を及ぼす要因として、使用材料による要因、調合による要因および試験体による要因などがあげられる。そこで、本論文では、使用材料による要因および調合による要因として、セメントの種類、水セメント比、スランプおよび粗骨材のかさ容積の違いが弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響について実験研究し、それらの結果から圧縮強度推定式の誘導を行った。

3. コンクリートの使用材料および調合が弾性波速度に及ぼす影響

3.1 実験概要

弾性波速度に影響を及ぼす代表的な要因として、前章で述べたように、使用材料による要因、調合による要因および試験体による要因が考えられる。使用材料による要因として、セメントの種類および骨材の種類があげられ、調合による要因として、水セメント比、スランプおよび粗骨材のかさ容積があげられる。さらに、試験体に

表2 実験概要

| 実験項目                                      | セメントの種類      | 水セメント比 (%) | 粗骨材       |      | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 調査記号 | 供試体および養生方法         | 材 齢 (日)                              |
|---|--------------|------------|-----------|------|-----------|---------|------|--------------------|--------------------------------------|
|   |              |            | 最大寸法 (mm) | 種 類  |           |         |      |                    |                                      |
| (1)水セメント比およびスランブを変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係 | 普通ポルトランドセメント | 60         | 20        | 硬質砂岩 | 0.60      | 12      | 4.5  | φ100×200mm<br>標準養生 | 7, 14,<br>28, 56,<br>91<br>(1,2,3,5) |
|   |              | 50         |           |      |           |         |      |                    |                                      |
|   |              | 40         |           |      |           |         |      |                    |                                      |
|   | 普通ポルトランドセメント | 60         | 20        | 硬質砂岩 | 0.60      | 18      | 4.5  | φ100×200mm<br>標準養生 | 7, 14,<br>28, 56,<br>91              |
|   |              | 50         |           |      |           |         |      |                    |                                      |
|   |              | 40         |           |      |           |         |      |                    |                                      |
| (2)セメントの種類を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係       | 普通ポルトランドセメント | 50         | 20        | 硬質砂岩 | 0.60      | 12      | 4.5  | φ100×200mm<br>標準養生 | 7, 14,<br>28, 56,<br>91              |
|   | 早強ポルトランドセメント |            |           |      |           |         |      |                    |                                      |
|   | 高炉セメントB種     |            |           |      |           |         |      |                    |                                      |
| (3)粗骨材のかさ容積を変えた弾性波速度と圧縮強度との関係             | 普通ポルトランドセメント | 50         | 20        | 硬質砂岩 | 0.68      | 12      | 4.5  | φ100×200mm<br>標準養生 | 7, 14,<br>28, 56                     |
|   |              |            |           |      | 0.60      |         |      |                    |                                      |
|   |              |            |           |      | 0.55      |         |      |                    |                                      |
|   |              |            |           |      | 0.50      |         |      |                    |                                      |
|   |              |            |           |      | 0         |         |      |                    |                                      |
|   |              |            |           |      | 0         |         |      |                    |                                      |

\* ( )内はW/C=30%のみ実施

表3 使用材料の種類および性質

| 主材料  | 種類・性質  |
|------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm <sup>3</sup> ,比表面積3.280cm <sup>2</sup> /g)         |
|      | 早強ポルトランドセメント(密度3.14g/cm <sup>3</sup> ,比表面積4.490cm <sup>2</sup> /g)         |
|      | 高炉セメントB種(密度3.04g/cm <sup>3</sup> ,比表面積3.800cm <sup>2</sup> /g)             |
| 細骨材  | 茨城県真壁郡関城町関本肥土地先産洗砂<br>(密度2.58g/cm <sup>3</sup> ,吸水率2.82%,粗粒率2.60,実積率67.0%) |
| 粗骨材  | 埼玉県秩父産硬質砂岩砕石<br>(密度2.71g/cm <sup>3</sup> ,吸水率0.55%,粗粒率6.56,実積率58.8%)       |
| 混和剤  | AE減水剤:リグニンスルホン化合物ポリオール複合体  |
|      | 高性能AE減水剤:ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体   |
|      | 空気量調整剤:アルキルアルスルホン化合物系陰イオン界面活性剤   |

表4 コンクリートの調査および品質

| 調査記号      | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |      |      | 混和剤(kg/m <sup>3</sup> ) |        | 実測スランブ (cm) | 実測空気量 (%) | 実測単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|---------|-------------------------|-----|------|------|-------------------------|--------|-------------|-----------|-------------------------------|
|           |         | W                       | C   | S    | G    | AE減水剤                   | 空気量調整剤 |             |           |                               |
| N60-60-12 | 48.9    | 174                     | 290 | 870  | 954  | 0.87                    | 0.0087 | 10.4        | 6.0       | 2260                          |
| N50-60-12 | 47.4    | 175                     | 350 | 818  | 954  | 1.05                    | 0.0088 | 13.0        | 5.3       | 2294                          |
| N40-60-12 | 45.1    | 175                     | 438 | 747  | 954  | 1.31                    | 0.0088 | 12.0        | 4.6       | 2332                          |
| N30-60-12 | 41.9    | 170                     | 567 | 654  | 954  | *4.53                   | 0.0096 | 14.0        | 4.2       | 2366                          |
| N60-60-18 | 47.6    | 185                     | 308 | 826  | 954  | 1.23                    | 0.0108 | 20.3        | 5.4       | 2276                          |
| N50-60-18 | 46.3    | 183                     | 366 | 784  | 954  | 1.28                    | 0.0128 | 20.2        | 5.3       | 2291                          |
| N40-60-18 | 43.5    | 185                     | 463 | 700  | 954  | 1.84                    | 0.0162 | 19.4        | 6.0       | 2283                          |
| N30-60-18 | 41.9    | 170                     | 567 | 654  | 954  | *5.67                   | 0.0096 | 20.5        | 3.9       | 2363                          |
| H50-60-12 | 47.3    | 175                     | 350 | 816  | 954  | 1.05                    | 0.0105 | 12.8        | 4.6       | 2279                          |
| B50-60-12 | 47.0    | 175                     | 350 | 807  | 954  | 1.05                    | 0.0088 | 14.2        | 4.9       | 2298                          |
| N50-68-12 | 41.1    | 170                     | 340 | 718  | 1082 | 1.02                    | 0.0102 | 13.5        | 4.6       | 2324                          |
| N50-55-12 | 51.1    | 180                     | 360 | 873  | 875  | 1.08                    | 0.0072 | 10.0        | 4.3       | 2294                          |
| N50-50-12 | 55.6    | 180                     | 360 | 948  | 795  | 1.08                    | 0.0072 | 9.0         | 5.3       | 2276                          |
| N50-00-12 | 100     | 287                     | 575 | 1318 | 0    | 1.72                    | -      | 24.0        | 4.2       | 2151                          |

\* 高性能AE減水剤を示す

よる要因として、試験体の大きさ、養生方法および含水率があげられる。本論文では、これらのうち、水セメント比、スランブ、粗骨材のかさ容積およびセメントの種類について着目し、それぞれの構成を変えた実験を行った。実験は、水セメント比およびスランブを変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係、粗骨材のかさ容積を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係およびセメントの種類を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を明らかにするために、大きく分けて3種類行った。表2に実験概要を示す。水セメント比およびスランブを変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係では、水セメント比を30, 40, 50および60%の4種類とし、目標スランブを12cmおよび18cmとした。セメントは使用頻度の高い普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材のかさ容積を0.60m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>とした。次に、粗骨材のかさ容積を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係では、粗骨材のかさ容積を0, 0.50, 0.55, 0.60および0.68m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>の5種類とし、普通ポルトランドセメントを用いて水セメント比50%、スランブ12cmとした。さらに、セメントの種類を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係では、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種の3種類とし、水セメント比50%、粗骨材のかさ容積0.60m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>およびスランブ12cmとした。

コンクリート供試体はφ100×200mmの円柱供試体であり、打設後24時間で脱型し、標準養生を行った。材齢が7, 14, 28, 56および

91日において、弾性波速度測定および圧縮強度試験を行った。ただし、水セメント比30%で目標スランブ12cmの場合のみ、初期強度領域の傾向を調べるために材齢1, 2, 3および5日においても実験を行った。

### 3.2 使用材料および調査

使用材料の種類および性質を表3に示す。細骨材は茨城県真壁郡関城町産の川砂であり、粗骨材は埼玉県秩父産の硬質砂岩砕石である。混和剤は、水セメント比40%以上の場合はAE減水剤を、水セメント比30%の場合は高性能AE減水剤を用いた。

コンクリートの調査および品質を表4に示す。表中の調査記号は表2に対応するもので、セメントの種類、水セメント比、粗骨材のかさ容積および目標スランブを記号化したものである。

### 3.3 円柱供試体の弾性波速度測定方法

円柱供試体の弾性波速度測定は、写真1に測定状況を示すように、反射波法により衝撃弾性波の多重反射波を測定し、反射波の振動数および供試体の長さから弾性波速度を算出する方法で行った。この方法は、前章で述べたようにインパクトエコー法として一般的であり、円柱供試体のように形状が整った部材の測定においては、比較的簡便で安定した測定結果が得られる。

弾性波速度は、写真1のように、供試体端面をハンマーで垂直に

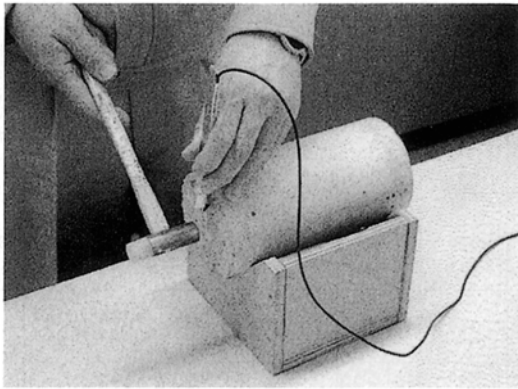


写真1 円柱供試体の弾性波速度測定状況

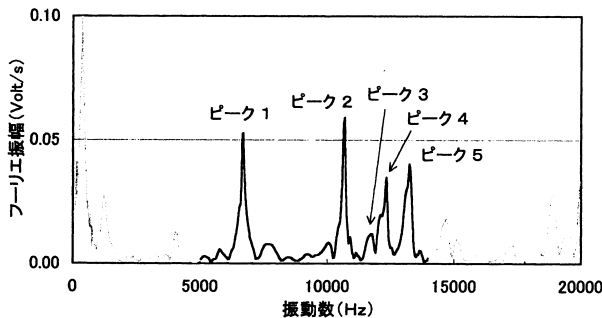


図3 円柱供試体の衝撃弾性波のフーリエスペクトルの一例

打撃して発生させた軸（縦）方向の衝撃弾性波を取込み、スペクトル解析により縦波の多重反射成分の1次振動数  $f_1$  を抽出し、供試体の長さ  $L$  を用いて式(1)により算出される。

$$V_p = 2L \cdot f_1 \quad (1)$$

図3は円柱供試体で測定した衝撃弾性波のフーリエスペクトルの一例であり、5000~14000Hzの振動数成分に着目して表示したものである。解析の諸元は、サンプリング周波数が150kHz、データ数が4096個によるFFTである。

着目した振動数の範囲には5つの顕著なピークがある。ピーク1およびピーク2は、共鳴振動法（JIS A1127）によるたわみ振動数および縦振動数と一致した。したがって、ピーク2は棒状体を伝播する縦波の反射振動数であると考えられる。なお、円柱供試体ではたわみ振動数に対する縦振動数の比は調合、材齢等に拘らず約1.61であった。ピーク3は、共鳴振動法では明確な共鳴点を示さないが、この振動数を式(1)の  $f_1$  として算出した速度値は超音波法による音速とほぼ一致するので、半無限体を伝播する縦波成分であると推測される。さらに、ピーク4は、供試体端面の外周付近を打撃した時に顕著に生ずる成分で、共鳴振動法においても同様な位置を加振した時に対応した振動数を示すことから、たわみ振動と縦振動の連成振動成分であると思われる。ピーク5はピーク1の2倍の振動数であることから、2次のたわみ振動数成分であると考えられる。

以上の検討から、コンクリートの弾性波速度として、ピーク2およびピーク3の振動数を用いて式(1)から算出される棒状体および半無限体を伝播する縦波速度を求めることとする。測定速度値は、3体の供試体の平均値とし、各供試体の速度値は供試体端面の3ヶ

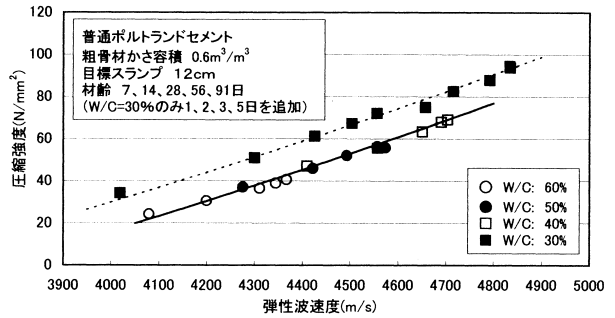


図4 水セメント比の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係 (目標スラブ12cmの場合)

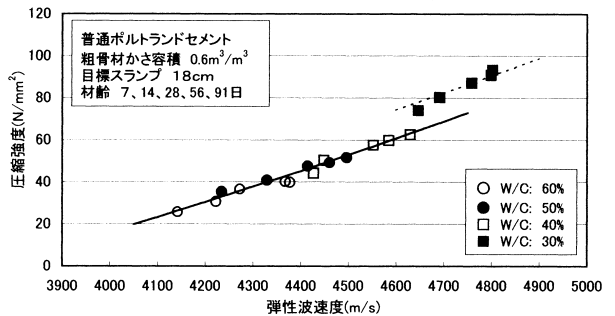


図5 水セメント比の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係 (目標スラブ18cmの場合)

所をハンマーで打撃して得られた3個の速度値の平均値とする。

なお、本研究では単に弾性波速度と言う場合は、半無限体を伝播する縦波速度とする。

### 3.4 結果および考察

#### (1) 水セメント比およびスラブを変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

目標スラブ12cmにおいて水セメント比の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を図4に、目標スラブ18cmの場合を図5に示す。いずれの水セメント比およびスラブにおいても、弾性波速度が大きくなると圧縮強度が大きくなる傾向が見られたが、水セメント比が30%の関係は、40、50、60%に比べ著しく異なっていた。特に、水セメント比が40~60%の弾性波速度と圧縮強度との関係は、両スラブともに、1つの2次曲線で表された。これに対し、水セメント比30%の弾性波速度と圧縮強度との関係は、水セメント比40~60%の関係に比べ、切片が大きくなる傾向となり、同一弾性波速度に対して高い圧縮強度を示していた。これと同様な傾向は参考文献19)の超音波速度と圧縮強度との関係において示されており、水セメント比が40%以下の低水セメント比になるとセメント量が増加するため、圧縮強度はほぼ比例的に増加するが、弾性波速度は比例的には増加していない。しかし、この原因については不明である。

スラブの違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係を図6に示す。弾性波速度と圧縮強度との関係は、水セメント比による違いは見られたが、スラブの違いによる影響は見られず、異なる水セメント比に対してそれぞれ1つの2次曲線で表された。

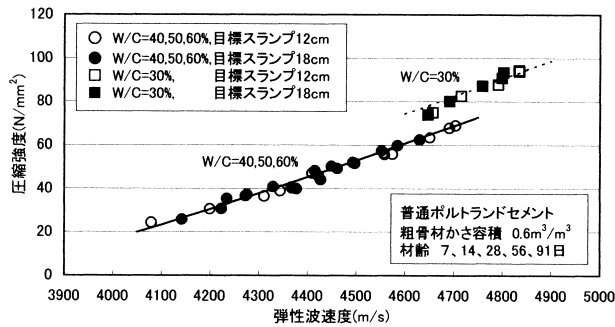


図6 スラブの違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

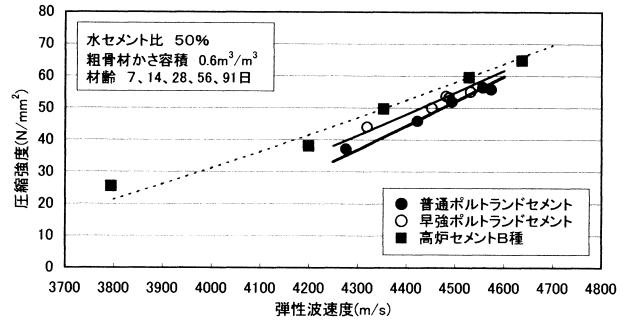


図8 セメントの種類の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

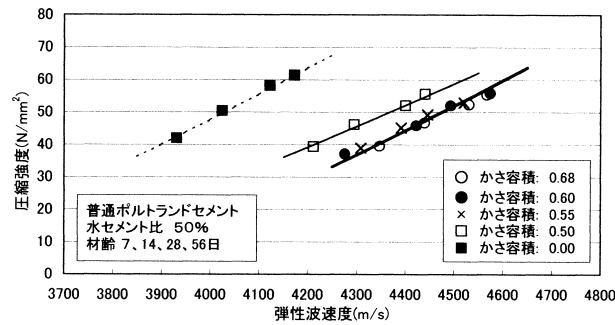


図7 粗骨材のかさ容積の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

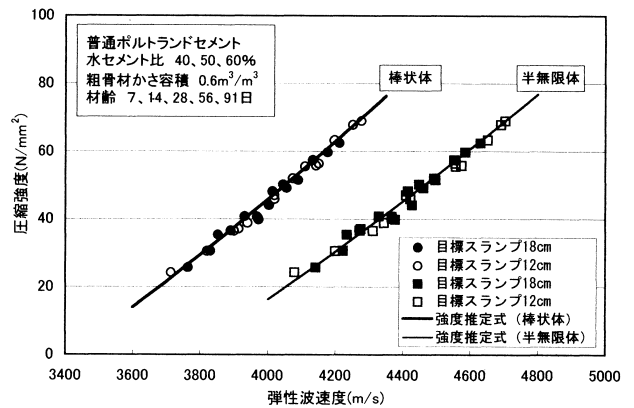


図9 一般的な調合の標準養生によるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

(2) 粗骨材のかさ容積を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

粗骨材のかさ容積の違いによるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を図7に示す。粗骨材のかさ容積が大きくなるに伴い、粗骨材の量が増加し、超音波法による音速<sup>20)</sup>と同様に、弾性波速度は大きくなる傾向が見られたが、圧縮強度は若干小さくなる傾向が見られた。弾性波速度と圧縮強度との関係は比例関係にあるものの、粗骨材のかさ容積の違いによりその傾向は異なった。これは、コンクリート中の構成割合として、モルタル分が増加すると弾性波速度が小さくなることを示している。しかしながら、粗骨材量が多く、モルタル分が比較的少ない調合範囲では変化の割合は低くなっており、かさ容積が 0.55~0.68 $\text{m}^3/\text{m}^3$  のとき、弾性波速度と圧縮強度との関係はほぼ一致した。これにより、一般的なコンクリートの調合において粗骨材のかさ容積は、およそ 0.58~0.68  $\text{m}^3/\text{m}^3$  の範囲にあるので、材料分離を生じていなければ、粗骨材のかさ容積の影響は少ないと考えられる。

(3) セメントの種類を変えたコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係

セメントの種類の違いによる弾性波速度と圧縮強度との関係を図8に示す。セメントの種類により弾性波速度と圧縮強度との関係は、若干異なる傾向が見られた。この傾向は、高炉セメントB種、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメントの順に、弾性波速度に対して圧縮強度が高くなった。早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントと比較的似た関係にあるのに対し、高炉セメントB種はやや異なる傾向が見られた。しかし、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種いずれも高材齢になるに従い、普通ポルトランドセメントの関係に接近する傾向が見られ、

高炉セメントB種においても材齢が91日以上ではほぼ一致していた。これはセメントの種類により強度発現性が異なり、硬化過程の影響が弾性波速度の違いになったと考えられる。このようにセメントの種類による弾性波速度と圧縮強度との関係は、セメント固有の強度発現性と弾性波速度の成長特性に起因していると思われる。

3.5 実験結果のまとめ

本章では、コンクリートの弾性波速度に影響を及ぼす要因として、水セメント比、スラブ、粗骨材のかさ容積およびセメントの種類に着目し、それぞれの構成を変えた実験を行い、弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響を調査した。その結果、普通ポルトランドセメントによる一般的な調合のコンクリート（圧縮強度が 20~70 $\text{N}/\text{mm}^2$ ）であれば、水セメント比、スラブおよび粗骨材のかさ容積の影響、すなわち調合による影響は少ないことが確認された。これにより、水セメント比 40~60%の実験結果を基に、一般的な調合の標準養生によるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係を図9に示す。丸印は棒状体を伝播する弾性波速度、四角は半無限体を伝播する弾性波速度と圧縮強度との関係である。しかしながら、高炉セメントB種の強度発現途上の材齢における弾性波速度と圧縮強度との関係および普通ポルトランドセメントにおいても40%を下回る低水セメント比の場合およびモルタル、人工軽量骨材などの場合の関係は、図9の関係とは異なるので注意が必要である。なお、図9の関係により、圧縮強度が 20 $\text{N}/\text{mm}^2$  以上では、弾性波速度と圧縮強度との関係に材齢が及ぼす影響はほとんど見られない。

一方、棒状体を伝播する弾性波速度、密度および動弾性係数の間には次章で述べる式(5)の関係があるので、図9の棒状体の弾性波速度と圧縮強度との関係に関して式(5)を用い、横軸を弾性波速度から動弾性係数に変換した。動弾性係数と圧縮強度との関係および回帰式を図10に示す。この結果、コンクリートの動弾性係数と圧縮強度との間には強い相関関係が認められ、相関係数は0.993であった。圧縮強度が20~70N/mm<sup>2</sup>の範囲において、動弾性係数と圧縮強度との関係は直線的<sup>2), 21)</sup>であるといえる。

4. 圧縮強度推定式の誘導

4.1 圧縮強度推定式の誘導方法

コンクリートの弾性波速度と圧縮強度の間には理論的な関係式が存在しないので、以下に示すように実験的な方法により、圧縮強度推定式を誘導することとした。

半無限体を伝播する弾性波速度をV、動弾性係数をE、密度をρ、ポアソン比をνとすれば、弾性波動論<sup>22)</sup>から動弾性係数は式(2)で表される。

$$E = \rho V^2 (1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu) \quad (2)$$

一方、コンクリートの動弾性係数と圧縮強度は、前章の実験結果のまとめで述べたように圧縮強度が20~70N/mm<sup>2</sup>の範囲において、直線的な関係になっているので、式(3)のように圧縮強度f<sub>c</sub>を動弾性係数に関する1次式で表す。

$$f_c = a E + b \quad (3)$$

ここに、a、bは、動弾性係数と圧縮強度の実験的關係式の係数であり、実験により定まるものとする。したがって、式(3)に式(2)を代入することにより、圧縮強度は弾性波速度、密度およびポアソン比を用いて式(4)で表される。

$$f_c = a \cdot c \cdot \rho V^2 + b \quad (4)$$

なお、 $c = (1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu)$ である。

他方、棒の縦振動理論<sup>22)</sup>から棒状体を伝播する弾性波速度をV<sub>p</sub>とすれば、動弾性係数は式(5)で表され、式(2)と同様に式(3)を適用することにより圧縮強度は式(6)で表される。

$$E = \rho V_p^2 \quad (5)$$

$$f_c = a \cdot \rho V_p^2 + b \quad (6)$$

さらに、式(2)および式(5)より棒状体の弾性波速度に対する半無限体の弾性波速度の比(弾性波速度比)γは式(7)で表されるので、cは式(8)より算出される。

$$\gamma = V / V_p = \sqrt{(1 - \nu) / (1 + \nu) (1 - 2\nu)} = \sqrt{1/c} \quad (7)$$

$$c = 1/\gamma^2 \quad (8)$$

そこで、多数の円柱供試体を用意して弾性波速度測定と圧縮強度試験を行い、弾性波速度と圧縮強度との関係を求める。そして、棒状体を伝播する弾性波速度と圧縮強度との関係を式(6)で回帰させて係数a、bを確定する。さらに、弾性波速度比を求めて式(8)から係数cを算出すれば、式(4)も確定され、実験的な方法により圧縮強度推定式が設定される。式(4)および式(6)をそれぞれ半無限体および棒状体の弾性波速度による圧縮強度推定式と呼ぶこととする。

4.2 圧縮強度推定式の設定

前章の実験結果のまとめで示した一般的な調査の標準養生によるコンクリートの弾性波速度と圧縮強度との関係(図9)に対して前

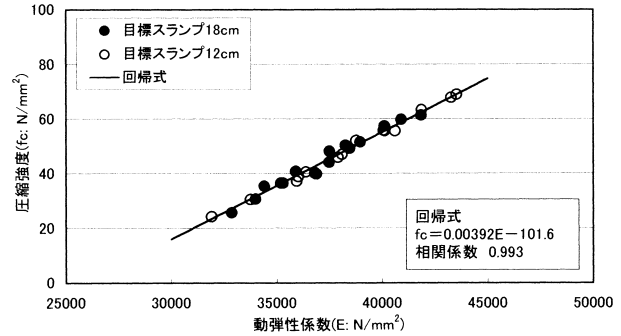


図10 動弾性係数と圧縮強度との関係

節で述べた圧縮強度推定式の誘導方法を適用し、その係数a、bおよびcを確定させ、一般的な調査の標準養生によるコンクリートの圧縮強度推定式を設定する。

一般に測定対象のコンクリート密度は未知であるので、ここではコンクリートの密度を任意に2.3g/cm<sup>3</sup>とする。まず、図9の棒状体の弾性波速度と圧縮強度との関係を式(6)で回帰させることにより、係数a=1/220、b=-121.5N/mm<sup>2</sup>が得られ、棒状体の弾性波速度による圧縮強度推定式として同図の太い実線が描かれる。

一方、図9にプロットした実験データの弾性波速度比の平均値は1.101であり、式(8)よりc=0.825が得られ、上記のa、bと共に式(4)に代入して圧縮強度を計算すると、同図の細い実線が描かれる。この回帰曲線は半無限体の弾性波速度と圧縮強度との関係(四角印)をよく捉えている。ここに、図9の太い実線および細い実線で表される関係式がそれぞれ、棒状体および半無限体の弾性波速度に対する一般的な調査の標準養生によるコンクリートの圧縮強度推定式として設定された。なお、弾性波速度比1.101を式(7)に適用すれば、動ポアソン比は0.255となり、既往の研究<sup>23)</sup>とほぼ一致している。

5. まとめ

構造体コンクリートの強度管理ならびに品質管理を目的とした弾性波速度による圧縮強度推定法において、精度の向上および適用範囲について検討するために、本実験研究ではコンクリートの各種要因が弾性波速度と圧縮強度との関係に及ぼす影響を明らかにした。さらに、実験から得られた弾性波速度と圧縮強度との関係から圧縮強度推定式を求め、その係数を設定した。

本実験結果から以下のことを明らかにした。

- (1) セメントの種類により弾性波速度と圧縮強度との関係は、若干異なる傾向が見られた。早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントと比較的似たような関係にあるのに対し、高炉セメントB種は弾性波速度が比較的低くなる傾向が見られた。しかし、早強ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種いずれも高材齢になるに従い、普通ポルトランドセメントの関数に接近する傾向が見られ、高炉セメントB種においても材齢が91日以上ではほぼ一致していた。
- (2) 水セメント比により弾性波速度と圧縮強度との関係に異なる傾向が見られた。水セメント比が30%の関係は、40、50、60%の関係とは異なる2次曲線となった。水セメント比40~60%では、弾性波速度と圧縮強度との関係はほぼ一致しており、水セメント比

の影響は殆んど見られなかった。

- (3) 弾性波速度と圧縮強度との関係にスランブの違いによる影響は殆んど見られなかった。
- (4) 粗骨材のかさ容積の違いにより、弾性波速度と圧縮強度との関係は比例関係にあるものの、その傾向は異なった。しかし、かさ容積が  $0.55 \sim 0.68 \text{ m}^3/\text{m}^3$  のとき、弾性波速度と圧縮強度との関係はほぼ一致していた。これにより、一般的なコンクリートの調合において粗骨材のかさ容積は、およそ  $0.58 \sim 0.68 \text{ m}^3/\text{m}^3$  の範囲にあるので、弾性波速度と圧縮強度との関係において粗骨材のかさ容積の影響は少ないと考えられる。
- (5) 以上の結果から、普通ポルトランドセメントを用いた一般的な調合のコンクリート（圧縮強度が  $20 \sim 70 \text{ N/mm}^2$ ）であれば、水セメント比、スランブおよび粗骨材のかさ容積の違いによる影響は少なく、弾性波速度と圧縮強度との関係は一つの2次曲線で表された。この関係に、本研究で誘導した圧縮強度推定式を回帰させ、一般的な調合の標準養生によるコンクリートの圧縮強度推定式を設定した。これにより、構造体コンクリートの弾性波速度を測定し、本圧縮強度推定式を用いて強度推定が可能となり、コンクリートの強度管理等に適用できるものと思われる。

なお、本論文では扱うことができなかった弾性波速度に影響を及ぼす他の要因に関する検討および構造体コンクリートへの適用に関する詳しい検討等は、今後の課題として研究を進めている。これらのデータの蓄積により、本論文で設定した圧縮強度推定式の係数を拡張して行く方針である。

#### 参考文献

- 1) 奥島正一、加藤金正、小坂義夫：コンクリート強度と音速とに関する実験、日本建築学会研究報告、Vol. 20, pp. 21-22, 1952
- 2) 十代田知三、野崎喜嗣、小林幸一：実大モデルによる超音波法、反発度法および複合法の検討—非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法、日本建築学会構造系論文報告集、No. 428, pp. 1-9, 1991. 10
- 3) 森濱和正、吉荒俊克、太田資郎：非破壊試験による圧縮強度の推定、非破壊検査、50(7), pp. 440-445, 2001. 7
- 4) 森濱和正、後藤俊宏：弾性波によるコンクリート強度推定のための検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、A, pp. 593-594, 2001
- 5) 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、1983
- 6) 黒野幸弘、山田和夫、中井裕司：PC床板の充填性に関する衝撃弾性波法の適用性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 18, No. 1, pp. 1221-1226, 1996
- 7) 岩野聡史、極壇邦夫、境友昭、森濱和正：衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23, No. 1, pp. 547-552, 2001

- 8) 阪井真人、木虎久人：衝撃弾性波法によるコンクリート中の欠陥評価—衝撃弾性波法にウェーブレット解析を用いた場合の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp. 597-598, 2001. 9
- 9) 極壇邦夫、境友昭：衝撃弾性波法のコンクリート空隙検知への適用性、土木学会第57回年次学術講演会、Vol. 23, No. 1, pp. 349-350, 2002. 9
- 10) 塚田幸広、市村靖光：インテグリティ試験による場所打ち杭の品質管理法、土木学会論文集、No. 603/III-44, pp. 139-146, 1998. 9
- 11) 立見栄司、辻定和、蓮尾孝一：衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp. 985-986, 2002. 8
- 12) 岩波光保、大即信明、二羽淳一郎、鎌田敏郎、長瀬重義：コンクリートにおける弾性波伝播挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集、No. 627 V-44, pp. 223-238, 1999. 8
- 13) ヴォラプッタポーネ コンキエット、十代田知三：条件の異なるコンクリートの音速と動弾性係数との関係—非破壊試験による構造体コンクリートの品質検査法の総合的検討(その2)—、日本建築学会構造系論文報告集、No. 527, pp. 15-19, 2000. 1
- 14) 山下英俊、堀孝司、熊谷守晃、喜多達夫：超音波伝播速度に及ぼす骨材の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23 No. 1, pp. 583-588, 2001
- 15) 立見栄司、中田善久、河谷史郎：衝撃弾性波によるコンクリートの非破壊圧縮強度推定法—コンクリートの構成材料が衝撃弾性波速度に及ぼす影響—、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1, pp. 815-816, 2003. 9
- 16) Mary Sansalone and Nicholas J. Carino : Impact-Echo Method, Concrete International, Vol. 10, No. 4, pp. 38-46, 1988. 4
- 17) 岩野聡史、境友昭、極壇邦夫、森濱和正：非破壊試験によるコンクリート品質、厚さ、鉄筋の計測に関する研究 その23 弾性波法によるコンクリートの強度の推定、日本非破壊検査協会平成13年度秋季大会講演概要集、pp. 111-114, 2001. 10
- 18) 岩野聡史、森濱和正、極壇邦夫、境友昭：弾性波速度の測定によるコンクリートの圧縮強度の推定、コンクリート工学年次論文集、Vol. 25, No. 1, pp. 1637-1642, 2003
- 19) 十代田知三、野崎善嗣、小林幸一：超音波法、反発度法および複合法による強度推定式の提案とその有効性の検証—非破壊試験による構造体コンクリートの強度推定法(その3)—、日本建築学会構造系論文報告集、No. 458, pp. 1-9, 1994. 4
- 20) 勝畑恭一、十代田知三：コンクリートの超音波速度に影響する因子—粗骨材の量および表面粗さ—、日本建築学会大会学術講演梗概集、A, pp. 253-254, 1993
- 21) 川上英男、脇敬一、今井重行：コンクリートの共振振動数・超音波伝播速度と弾性及び強度との関係について、コンクリート工学年次論文集、Vol. 15, No. 1, pp. 619-624, 1993
- 22) 例えば、藤原邦男：振動と波動、サイエンス社
- 23) 尼崎省二：コンクリートの弾性波速度に及ぼす鋼材の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 24, No. 1, pp. 1491-1496, 2002

(2004年5月10日原稿受理、2004年9月17日採用決定)