

# 衝撃弾性波法と微破壊試験の併用による 構造体コンクリートの圧縮強度推定方法の提案

岩野 聡史<sup>1</sup>・森濱 和正<sup>2</sup>・渡部 正<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 リック株式会社 技術研究所 (〒143-0004 東京都大田区昭和島2-4-3)  
E-mail: siwano@ri-k.co.jp

<sup>2</sup>正会員 独立行政法人土木研究所 材料資源研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)  
E-mail: kmoriha@pwri.go.jp

<sup>3</sup>正会員 日本大学准教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)  
E-mail: watanabe.tadashi@nihon-u.ac.jp

衝撃弾性波法によるコンクリートの圧縮強度の推定方法に、弾性波速度と圧縮強度の相関関係を用いる方法がある。今回の実験では、この衝撃弾性波法による推定方法と微破壊試験である小径コア法を併用する圧縮強度の推定方法を、以下のとおり考案し、その精度を検証した。まず、新設構造物の建設時に作製した66種類の配合の円柱供試体で弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係の特徴を明らかにした。次に、この特徴を利用し、既設構造物の1箇所弾性波速度と小径コア強度を測定し、その関係より、構造物の任意の位置で弾性波速度を測定して圧縮強度を推定する方法を考案した。既設構造物において、考案した方法の精度の検証を行なった結果、±15%程度の誤差で圧縮強度を推定できることを確認した。

**Key Words :** *non destructive test, impact elastic wave method, compressive strength of concrete, velocity of elastic wave, small diameter cores method*

## 1. はじめに

コンクリートの圧縮強度は、コンクリート構造物の安全性能を判断する上で重要な指標値となる。これから、新設構造物では設計で要求されている圧縮強度を満足しているのかを検査することや、長年供用されている既設構造物が現在どの程度の圧縮強度であるのかを把握することは、コンクリート構造物の維持管理において、極めて重要な情報になると考えられる。

現在一般的に実施されている構造体を構成するコンクリート（以下、構造体コンクリートという<sup>1)</sup>）の圧縮強度の試験方法は、コンクリート表面からφ100mmのコアを採取する破壊試験による方法や、コンクリート表面の反発度から強度を推定する方法である。しかし、前者の破壊試験では、実施できる箇所や数が制限され、コンクリート構造物の安全性能を判断する上で試験の実施が必要な位置において直接試験が実施できない場合があるという課題がある。また、後者は、反発度の測定方法についての規格が制定され、広く普及されている技術ではあるが、測定した反発度から圧縮強度を精度よく推定する方法は十分に確立されておらず、精度に課題があること

が指摘されている<sup>2)</sup>。また、古くから非破壊試験手法である超音波法により、測定した弾性波速度（超音波伝搬速度）を用いたコンクリートの強度推定に関する研究が行われてきた。しかし、弾性波速度と圧縮強度の関係は、水セメント比、粗骨材の量（容積比）や粒径などの条件を変化させると変化することから、あらゆるコンクリートに対して適用できる有効な推定方法を決定することは事実上不可能であるとされている<sup>3)</sup>。

これらを背景にして、近年では、衝撃弾性波法や超音波法による圧縮強度の推定方法として、試験対象の構造体コンクリートと同一配合の円柱供試体を作製し、この円柱供試体で、弾性波速度から圧縮強度に換算する式（以下、強度推定式という）を設定して、構造体コンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する試験方法が提案されている<sup>4)~7)</sup>。これらは任意の箇所で行える非破壊試験であり、また、コンクリート表面から採取したφ100mmのコアの圧縮強度と±15%程度の誤差で圧縮強度を推定できる。さらに、構造体コンクリートの表面で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法であり、背面が埋設された構造物や部材厚さの厚い構造物にも適用できる。これらの特長から、新設工事の

施工管理で実施する試験方法に採用されている<sup>8)</sup>。しかし、これらの試験方法を既設構造物で適用するには、強度推定式の設定方法が明確でなく、また、コンクリート表面での弾性波速度の測定方法の検討が不十分であり、適用が困難であるという課題があった。

そこで、今回の研究では、既設構造物にも適用できる圧縮強度の推定方法として、衝撃弾性波法により測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法と微破壊試験方法である小径コア法<sup>9)</sup>とを併用する方法（以下、本法という）を検討した。具体的には、先ず、66種類の配合の円柱供試体を作製し、弾性波速度と圧縮強度を測定して、両者の関係の特徴を明らかにした。次に、この特徴から、既設構造物で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法を考案し、円柱供試体においてこの推定方法を検証した。さらに、建設後43年が経過した既設構造物を実験対象構造物として、既設構造物における弾性波速度の測定方法の検討と、小径コア法を併用した圧縮強度の推定方法の精度の検証を行なった。

なお、本法の比較対象は、構造体コンクリートのうちコンクリート表面から採取したコアの圧縮強度である。また、コンクリートの圧縮強度は表面付近と内部では異なる場合があるが、表面から100mm以深では、ほぼ一定になることが示されている<sup>10)</sup>。これから、コアの表面付近と内部で圧縮強度が異なる場合には、深さ100mm以深の圧縮強度を比較対象としている。つまり、本法で推定しようとする圧縮強度は、弾性波速度の測定位置における構造体コンクリートの内部の圧縮強度である。

## 2. 衝撃弾性波法による新設構造物の強度推定方法に関する既往の手法

筆者らの既往の研究で提案している新設構造物を対象とした圧縮強度の推定手順を図-1に示す。実構造物で測

定した弾性波速度から、弾性波速度と圧縮強度の関係を利用して、圧縮強度を推定する方法である。ただし、弾性波速度と圧縮強度の関係は、参考文献<sup>3)</sup>でも指摘されているとおり、コンクリートの水セメント比や使用材料等の相違によって異なることから、構造物に使用するコンクリートと単位容積質量、水セメント比、使用材料等が全て等しい同一配合の円柱供試体を用いて、事前に弾性波速度と圧縮強度を測定し、強度推定式を設定する手順としている。強度推定式は、円柱供試体を12本作製し、材齢約7日、約14日、約28日、約91日（早強セメントでは約3日、約7日、約28日、約91日）の4材齢で、3本ずつ弾性波速度と圧縮強度を測定し、式(1)に示す関係式を最小二乗法により設定することとしている。ここで、材齢約7日～約91日の4回で実施するのは、広範囲の弾性波速度および圧縮強度において両者の関係を把握することが有効であるからである。

$$f'_c = \beta \times V_p^\alpha \quad (1)$$

ここに、 $V_p$ は弾性波速度、 $f'_c$ は圧縮強度、 $\alpha$ 、 $\beta$ は定数である。両者の関係式を式(1)に示す指数関数としているのは、周知のとおり、弾性波速度と弾性係数は式(2)の関係にあることと、圧縮強度と弾性係数が式(3)の関係にあることから<sup>11)</sup>、この両式を連立させたものである。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

$$E_D = A \times f'_c{}^B \quad (3)$$

ここに、 $V_p$ は弾性波速度、 $E$ は弾性係数、 $\rho$ は密度、 $\nu$ はポアソン比、 $E_D$ は動弾性係数、 $f'_c$ は圧縮強度、 $A$ 、 $B$ は定数である。以上のとおり、強度推定式を事前に設定する手順としているが、既設構造物で強度推定式を設定する方法は、(a)試験を実施する構造体コンクリートと同一配合の円柱供試体を新規に作製できること、または、

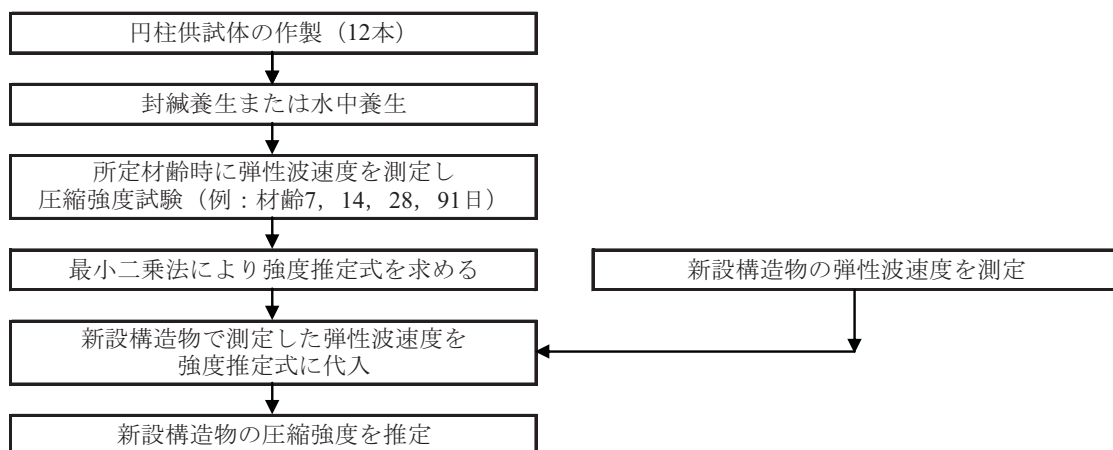


図-1 新設構造物での衝撃弾性波法による圧縮強度推定手順

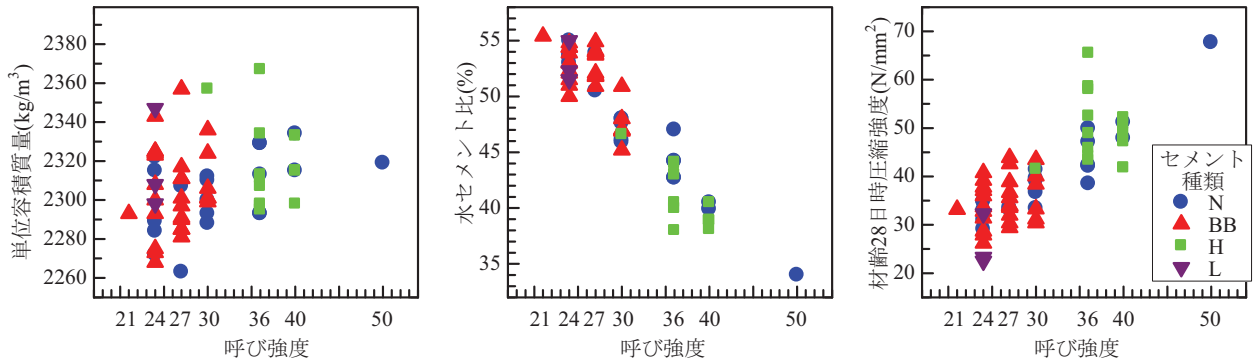
(b)試験を実施する構造体コンクリートから弾性波速度と圧縮強度が大きく変化する条件のコアを数本採取できることとなる。従って、既設構造物への適用は困難であり、試験方法を新たに検討することが必要となる。

### 3. 既設構造物へ適用するための円柱供試体での検討

#### (1) 実験内容

新設構造物の建設時に66種類の配合のコンクリートで円柱供試体を12本ずつ作製した。これらの円柱供試体に

対して、2章に示した手順により弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係式がコンクリートの配合によってどのように変化するかを確認した。この結果から、既設構造物の試験に適用できる強度推定式の設定方法を検討した。実験に用いた円柱供試体のセメント種類と呼び強度の内訳を表-1に、単位容積質量、水セメント比および材齢28日時の圧縮強度の平均値の分布を図-2に示す。実験に用いた配合は66種類であり、コンクリートの製造は関東、中部、近畿、中国、九州地方の複数の工場で行ったため、セメント種類、呼び強度が同じであっても使用材料が異なる配合となっている。また、セメント種類は4種類、材齢28日時の圧縮強度は22.5N/mm<sup>2</sup>~67.7N/mm<sup>2</sup>



(a) 円柱供試体の単位容積質量の分布 (b) 円柱供試体の水セメント比の分布 (c) 円柱供試体の28日強度の分布  
 図-2 実験に用いた円柱供試体の単位体積質量、水セメント比の分布

表-1 実験に用いた円柱供試体のコンクリートの種類 (セメント種類、呼び強度別の数量)

| セメント種類<br>呼び強度 | N | BB | H | L |
|----------------|---|----|---|---|
| 21             | 0 | 1  | 0 | 0 |
| 24             | 5 | 11 | 0 | 3 |
| 27             | 2 | 11 | 0 | 0 |
| 30             | 5 | 6  | 1 | 0 |
| 36             | 5 | 0  | 8 | 0 |
| 40             | 2 | 0  | 5 | 0 |
| 50             | 1 | 0  | 0 | 0 |

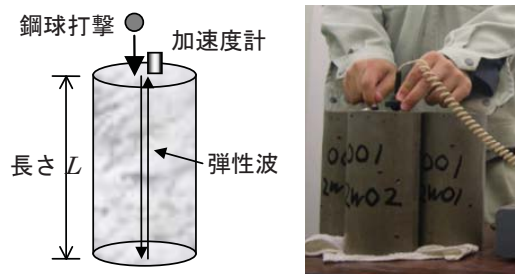
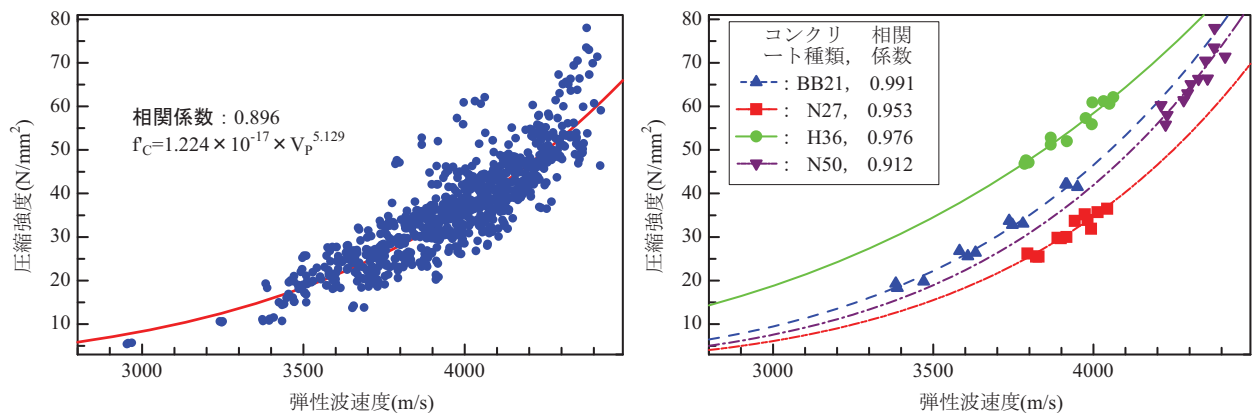


図-3 円柱供試体での弾性波速度の測定状況



(a) 全供試体での比較 (b) 配合別での比較  
 図-4 弾性波速度と圧縮強度の関係：全供試体での比較(a)と配合別での比較(b)

である。今回の実験に用いた円柱供試体は一般的に使用されるコンクリートをほぼ網羅できていると考えられる。

弾性波速度の測定状況を図-3に示す。コンクリート表面に加速度計を手で押さえつけ、近傍を直径10mmの鋼球で打撃し、内部を多重反射する弾性波の周波数を周波数解析により求め<sup>12)</sup>、ノギスにより計測した円柱供試体の長さから式(4)により弾性波速度を測定した。

$$V_p = 2 \cdot L \cdot f_0 \quad (4)$$

ここに、 $V_p$ は弾性波速度、 $L$ はノギスにより計測した円柱供試体の長さ、 $f_0$ は多重反射による周波数である。

測定に使用した加速度計は圧電型加速度計（感度10mV/(m/s<sup>2</sup>）、周波数範囲0.3Hz～12kHz）で、サンプリング間隔は10μs、サンプリングデータ数は4096個である。円柱供試体は端面を研磨により仕上げ、布の上に設置した。弾性波速度は1本の円柱供試体で5回測定し、平均値から弾性波速度を決定した。弾性波速度の測定後に、JIS A 1108により圧縮試験を実施し、弾性波速度と圧縮強度の関係を調査した。

## (2) 弾性波速度と圧縮強度の測定結果

66種類の配合の全円柱供試体で得られた弾性波速度と圧縮強度の関係を図-4(a)に示す。両者を式(1)に示す指数関数で回帰すると、式(5)に示す関係式が相関係数0.896で得られた。

$$f'_c = 1.224 \times 10^{-17} \times V_p^{5.129} \quad (5)$$

66種類の配合の全円柱供試体で得られた弾性波速度と圧縮強度には、ある程度の相関関係がある。しかし、

例えば弾性波速度 4000m/s での圧縮強度は、式(5)の回帰式では 36.5N/mm<sup>2</sup>となるのに対して、図-4 (a)より、実際には約 25N/mm<sup>2</sup>～約 60N/mm<sup>2</sup>と広範囲に分布している。

これから、強度推定式として式(5)を採用し、弾性波速度の測定結果から圧縮強度を推定すれば、誤差が 45%以上となる場合があり、推定精度に課題が生じることとなる。

これに対して、単位容積質量、水セメント比、コンクリートの製造工場、使用材料等が全て等しい同一配合のコンクリートでの弾性波速度と圧縮強度の関係の一例を図-4(b)に示す。本実験では、66種類の配合のコンクリートで円柱供試体を 12本ずつ作製したが、図-4(b)では、任意の4種類の配合のコンクリートについて、円柱供試体 12本で測定した弾性波速度と圧縮強度との関係を示した。同一配合のコンクリートでは、実際の測定結果と回帰曲線との誤差が小さく、弾性波速度と圧縮強度は相関係数 0.912～0.991 と強い相関関係である。

以上のように、弾性波速度と圧縮強度の関係は、2章でも示したとおり、コンクリートの配合や使用材料などの影響によって異なることが改めて確認された。

## (3) 既設構造物での強度推定式の設定方法の検討

### a) 弾性波速度と圧縮強度の关系到及ぼす配合条件の影響

コンクリートの配合によって、弾性波速度と圧縮強度の関係式がどのように変化しているのかを確認した。

まず、66種類の配合毎に式(1)に示す弾性波速度と圧縮強度の関係式を最小二乗法により求め、弾性波速度 $V_p$ を4000m/sとしたときの圧縮強度 $f'_c$ を計算して比較した。その結果を図-5に示す。図-5の縦軸は弾性波速度を4000m/s

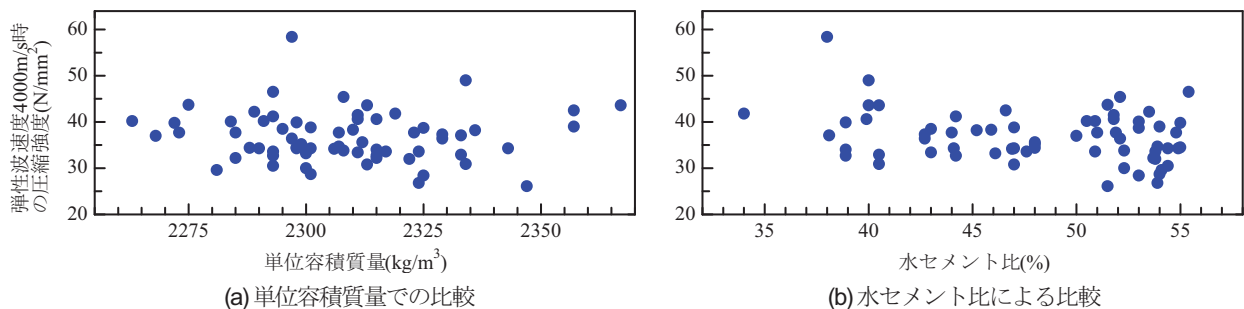


図-5 弾性波速度 4000m/s 時の圧縮強度推定結果：単位容積質量での比較(a)と水セメント比による比較(b)

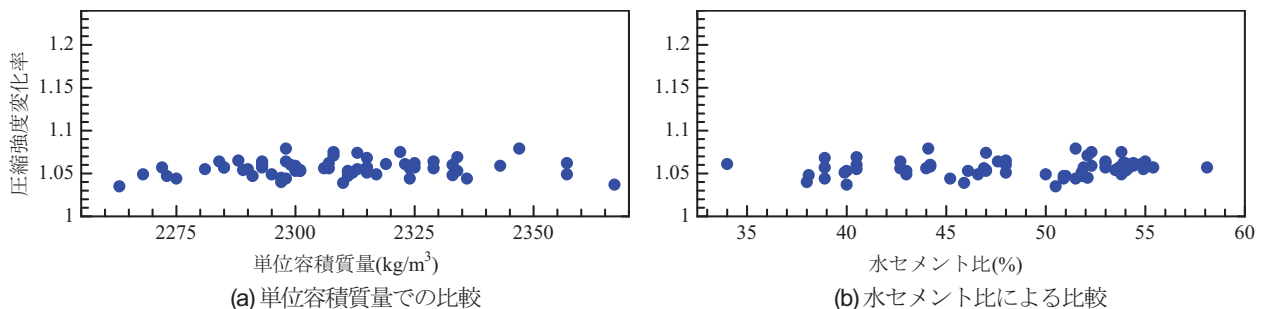


図-6 弾性波速度が 1%増加した時の圧縮強度の変化率：単位容積質量での比較(a)と水セメント比による比較(b)

としたときの圧縮強度，横軸は図-5(a)では単位容積質量，図-5 (b)では水セメント比である．図-5より，弾性波速度を4000m/sとしたときの圧縮強度は配合によって大きく変化するが，単位容積質量と水セメント比では関連付けられないことが分かる．次に，66種類の配合毎に式(1)に示す弾性波速度と圧縮強度の関係式を最小二乗法により求め，弾性波速度が1%増加したときの圧縮強度の変化率を比較した．その結果を図-6に示す．図-6より，弾性波速度が1%増加したときの圧縮強度の変化率は1.03～1.07であり，単位容積質量，水セメント比，配合が変化しても変化率に大きな差がないことが確認された．

#### b) 既設構造物での強度推定式の設定方法について

図-6の結果は，式(1)での定数 $\beta$ と図-4(b)での回帰曲線の切片は配合によって大きく変化するものの，式(1)での定数 $a$ と図-4(b)での回帰曲線の勾配は配合が異なっても変化しないことを示す．これから，ある配合のコンクリートで測定した弾性波速度から，式(5)に示される全配合での弾性波速度と圧縮強度の関係式で暫定的に圧縮強度 $f_{CT}$ （以下，暫定推定強度という）を推定すると，実際の圧縮強度 $f_c$ と暫定推定強度 $f_{CT}$ との比率（以下，補正比率という）は，同一配合のコンクリートであればほぼ一定値になると考えられる．つまり，暫定推定強度 $f_{CT}$ と実際の圧縮強度 $f_c$ には，同一配合のコンクリートであれば定数 $k$ により，式(6)に示す関係が成立すると考えられる．

$$f'_c = k \times f'_{CT} \quad (6)$$

この仮定を確認するため，図-4(b)に示される4配合のコンクリートについて，得られた弾性波速度から式(5)により算出した暫定推定強度と，円柱供試体の圧縮強度とを比較した．その結果を図-7に示す．最小二乗法により両者の関係を確認すると，同一配合のコンクリートであれば，両者は高い相関係数で式(6)に示す直線比例関係となり，定数 $k$ が得られることが確認された．

以上の結果より，式(6)に示す関係式の定数 $k$ （以下，補正比率 $k$ という）が求めれば，この補正比率 $k$ を利用して，コンクリートの圧縮強度が推定できると考えられる．その方法は，まず，弾性波速度を測定して暫定推定強度を求め，この位置でコアを採取して圧縮強度を測定し，補正比率 $k$ を求める．次に，同一配合の任意の測定点で弾性波速度を測定して暫定推定強度を求め，補正比率 $k$ を乗じて補正する推定方法である．

この推定方法の精度を検証するため，表-1に示した66種類の配合のコンクリートを用いて，以下の手順により，検討を行なった．

1)材齢約91日で測定した円柱供試体3本のうち，1本について，測定した弾性波速度から，式(5)により暫定推定強度 $f_{CT}$ を算出．

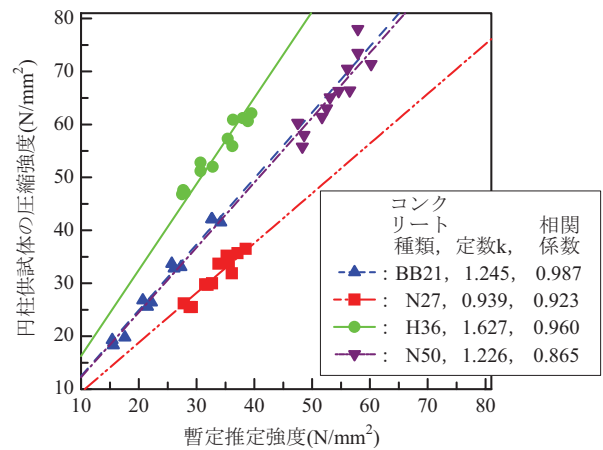


図-7 暫定推定強度と円柱供試体の圧縮強度との関係について同一配合の供試体での比較

- 2) 1)により算出した暫定推定強度 $f_{CT}$ と円柱供試体の圧縮強度 $f_c$ から式(6)により補正比率 $k$ を算出．
- 3)材齢約91日で測定した円柱供試体3本のうち残り2本を同一配合のコンクリートとして，測定した弾性波速度から，式(5)により暫定推定強度 $f_{CT}$ を算出し2)により算出した補正比率 $k$ を乗じて圧縮強度 $f_c$ を算出．
- 4)3)の算出結果と円柱供試体の圧縮強度との比較．

ここで，暫定推定強度および補正比率の算出を材齢約91日で測定した円柱供試体の1本のみからとしたのは，材齢が経過している既設構造物での適用を想定し，さらに，コア採取をなるべく少なくすることを考慮したものである．円柱供試体の圧縮強度と各推定方法での推定結果との比較を表-2，図-8に示す．図-8(a)は暫定推定強度との比較，図-8(b)は2章に示す新設構造物で採用をしている式(1)の強度推定式の設定による推定強度との比較，そして，図-8(c)は上記に手順を示した暫定推定強度に補正比率を乗じて算出した推定強度との比較結果である．

各比較結果を見ると，図-8(a)の暫定推定強度は，配合による影響を反映していないことから，実際の圧縮強度との誤差が大きくなっている．これに対して，図-8(c)に示す，上記に手順を示した補正比率を算出する補正を行なえば，図-8(b)の2章に示す12本の円柱供試体での強度推定式より精度は若干劣るものの，変動係数5.8%で圧縮強度を推定できることが確認された．

#### (4) 既設構造物へ適用するための円柱供試体での検討結果のまとめ

2章に示した，筆者らの既往の研究で提案される新設構造物を対象とした圧縮強度の推定手順では，構造体コンクリートと同一配合の円柱供試体を12本作製し，強度推定式を設定する手順としている．しかし，既設構造物ではこの設定は困難であり，全66種類の配合での円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の測定結果から，既設

構造物での試験に適用できる強度推定式の設定方法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) コンクリートの弾性波速度と圧縮強度の関係は、配合によって変化し、同じ弾性波速度での圧縮強度は配合によって大きく異なる。
- 2) 弾性波速度の増加に対する圧縮強度の変化率に配合による大きな変化はない。これから、同一配合のコンクリートであれば、弾性波速度を測定して求めた暫定推定強度は、円柱供試体の圧縮強度と直線比例関係となり、比例定数が補正比率として得られる。
- 3) 以上から、既設構造物では弾性波速度の測定箇所コア採取による圧縮強度を測定し、補正比率を求めれば、同一配合の任意の測定点で測定した弾性波速度から圧縮強度を推定できると考えた。66種類の配合の円柱供試体で検証すると、変動係数5.8%で圧縮強度を推定できることが確認された。

#### 4. 既設構造物での弾性波の伝搬特性の検討による弾性波速度の測定方法の検討

##### (1) 実験概要

3章では、既設構造物での試験に適用できる強度推定式の設定方法を検討したが、圧縮強度の推定には、弾性波速度を正確に測定することも重要となる。特に、既往の研究により<sup>19)</sup>、既設構造物ではコンクリート表面付近と内部では弾性波速度が異なる場合があることが報告されている。そこで本章では、実構造物での衝撃弾性波法による弾性波速度の測定結果、φ25mmの小径コアによる圧縮試験結果、φ142mmのコアによる反発度の測定結果、これらを比較して、既設構造物で圧縮強度を推定するための弾性波速度の測定方法を検討した。

実験対象の構造物は、建設後43年が経過したL式橋台2基であり、測定位置を表-3、図-9に示す。使用したコンクリートの配合は不明である。9箇所で弾性波速度を測定し、弾性波速度の測定後に、9箇所で6箇所で写真-2に示すφ25mmの小径コアを採取して、3箇所でφ142mmのコアを採取した。

##### (2) 実構造物での弾性波速度の測定方法

実構造物での弾性波速度の測定状況を写真-3に示す。コンクリート表面で縦波の伝搬時間差を測定し、弾性波速度を測定する方法（以下、表面法という）である。コンクリート表面に圧電型加速度計（感度10mV/(m/s<sup>2</sup>）、周波数範囲0.3Hz～12kHz）を手で押さえつけ、距離L離れた位置を衝撃加速度計（感度0.05mV/(m/s<sup>2</sup>）、周波数範囲0.4Hz～10kHz）を取り付けたハンマーにより打撃した。表面をハンマーで打撃するとコンクリート内部には弾性

表-2 圧縮強度推定結果の誤差の比較

|                               | 標準偏差<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 変動係数<br>(%) |
|-------------------------------|------------------------------|-------------|
| 式(5)による<br>暫定推定強度             | 6.3                          | 13.5        |
| 新設構造物で採用をしている<br>強度推定式による推定強度 | 2.1                          | 4.6         |
| 暫定推定強度に補正比率を<br>乗じた推定強度       | 2.7                          | 5.8         |

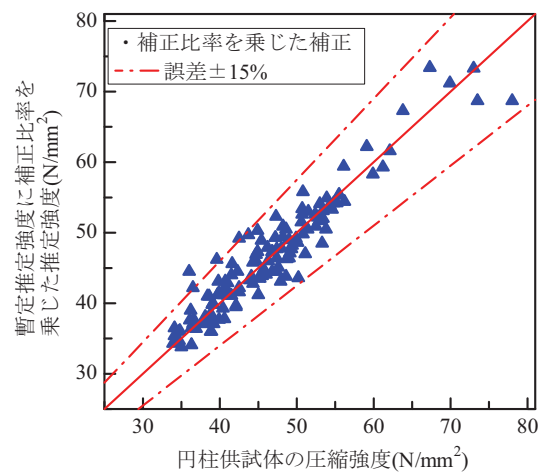
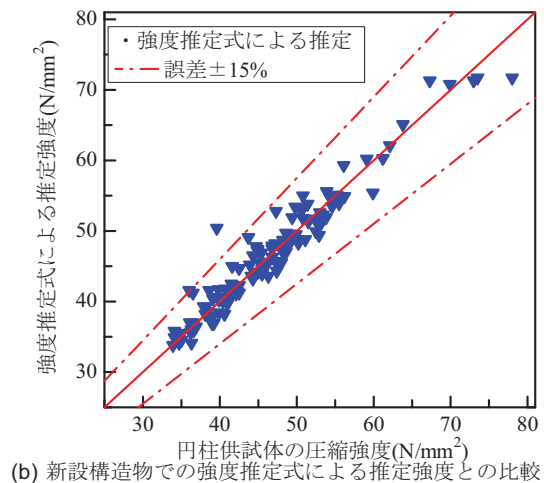
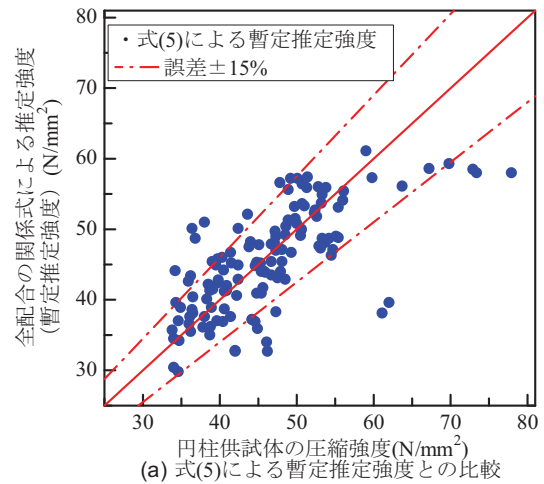


図-8 圧縮強度の推定方法による誤差の比較

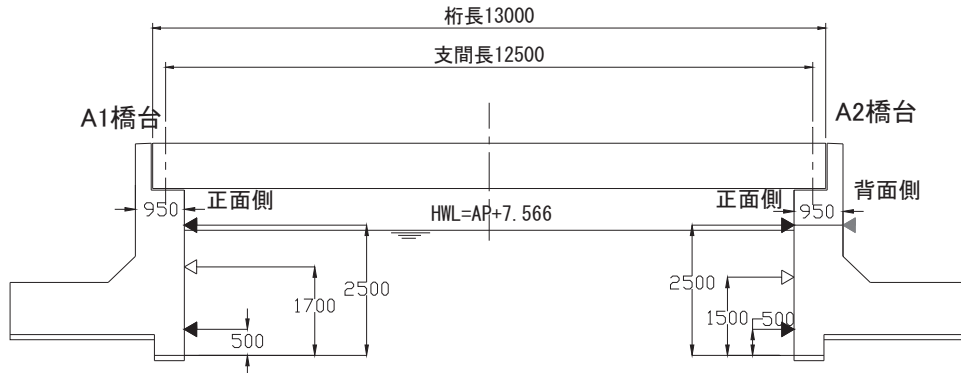
表-3 実構造物での測定位置

| 測定部材名   | 測定位置名称 | 採取したコアの種類 |
|---------|--------|-----------|
| A1橋台正面側 | No.1   | 小径コア      |
|         | No.2   | 小径コア      |
|         | No.3   | φ 142mm   |
| A2橋台正面側 | No.4   | 小径コア      |
|         | No.5   | φ 142mm   |
|         | No.6   | 小径コア      |
| A2橋台背面側 | No.7   | 小径コア      |
|         | No.8   | 小径コア      |
|         | No.9   | φ 142mm   |



写真-1 測定対象構造物の状況 (A2橋台正面側)

測定位置(側面図)



測定位置(正面図)

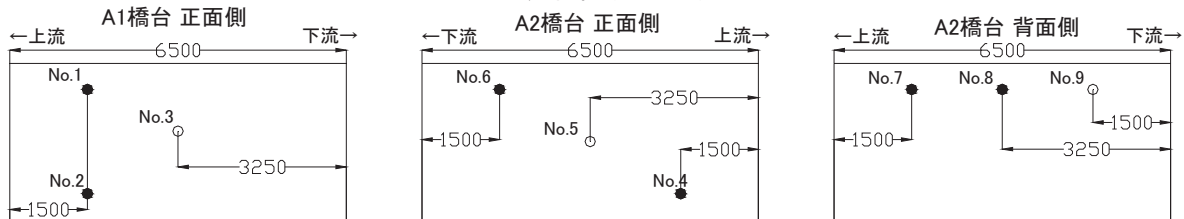


図-9 測定位置図 (単位: mm)



写真-2 小径コア法により採取した試験片 (φ25mm)



写真-3 衝撃弾性波法による測定状況写真

波が発生し、図-10の模式図に示すとおり、内部を球面状に伝搬する。これから、コンクリート内部の弾性波の速度の測定方法として、表面法が一般化されている<sup>14), 15)</sup>。表面法は、弾性波のうち縦波の速度が最も速いことを利用して、図-11に示すとおり、入力波形と受信波形に最初に到達する振動との時間差から縦波の伝搬時間差、速度を測定する方法である。入力波形はハンマーに取り付けた衝撃加速度計で、受信波形は受信点に設置した圧電型加速度計から記録した。ハンマーの総質量は18g、サンプリングクロックは0.5μsである。入力点と受信点と

の距離（以下、入力受信点間距離という） $L$ は、200mmから50mm間隔で1000mmまでである。

### (3) 実構造物での弾性波速度の測定結果

測定結果の一例として、4箇所測定された各入力受信点間距離での伝搬時間差と測定上の弾性波速度の測定結果を図-12に示す。ここで、測定上の弾性波速度とは、入力受信点間距離  $L$  を測定された伝搬時間差  $T_p$  で除して計算した速度である。測定結果より、A1橋台正面側 No.3、A2橋台正面側 No.5 では、測定上の弾性波速度は

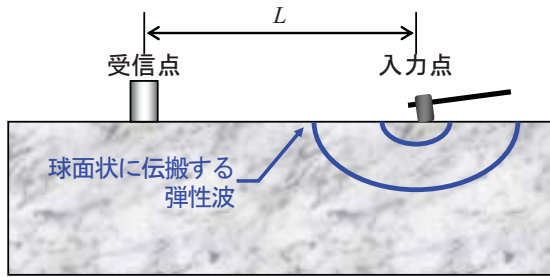


図-10 入力した弾性波の伝搬状況の模式図

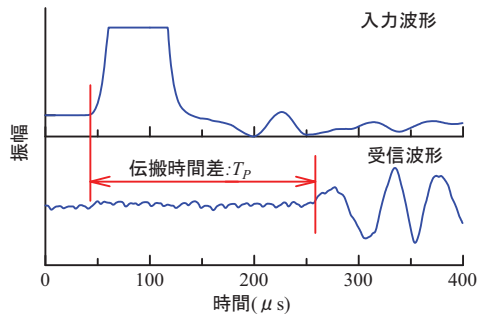
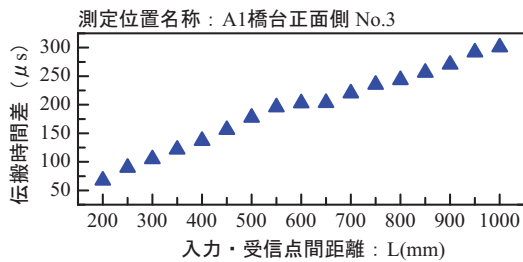
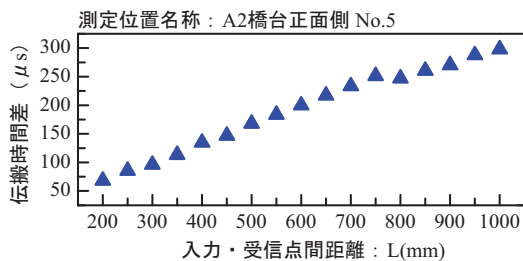
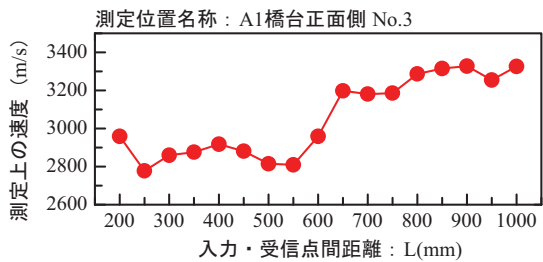


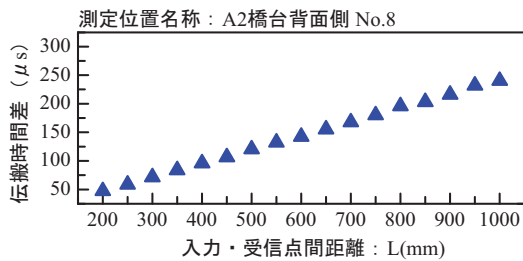
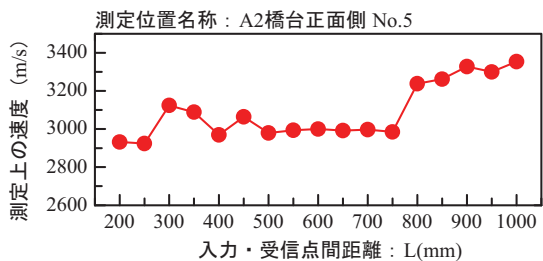
図-11 実構造物での弾性波速度の測定状況



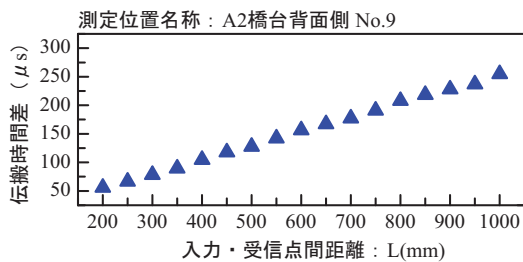
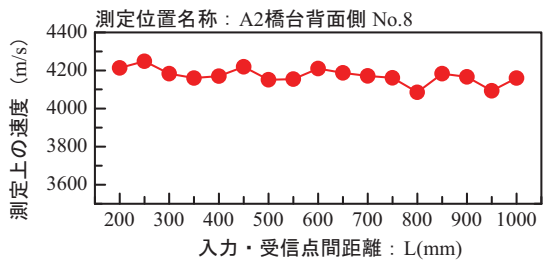
(a) 測定位置名称: A1橋台正面側No.3



(b) 測定位置名称: A2橋台正面側No.5



(c) 測定位置名称: A2橋台背面側No.8



(d) 測定位置名称: A2橋台背面側No.9

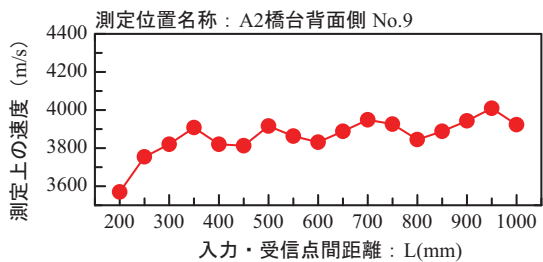


図-12 伝搬時間差と弾性波速度の測定結果の例

入力受信点間距離  $L$  によって変化し、距離  $L$  が長くなると速くなることが確認される。一方、A2 橋台背面側では、No.9 の距離  $L=200\text{mm}$  付近での速度は低下しているものの、それ以外における距離  $L$  による速度の変化は A1 橋台正面側、A2 橋台正面側と比較して大きくない。

入力受信点間距離により測定上の速度が変化するのは、

コンクリート表面付近を伝搬する弾性波の速度がコンクリート内部を伝搬する弾性波の速度よりも、何らかの原因により遅くなるためであると考えられる。この状況での縦波の伝搬状況はスネルの法則に基づき、図-13 の模式図で示される<sup>16)</sup>。入力受信点間距離が近距離の場合では、受信点に最初に到達する振動は表面を伝搬した縦波



(以下、表面弾性波という)となる。これに対して、入力受信点間距離が長くなると、伝搬速度の速い内部を経由した縦波(以下、内部弾性波という)が、伝搬速度の遅い表面弾性波を追い抜いて、受信点に最初に到達する振動となる。本法では、図-11に示したとおり、最初に受信点に到達する振動から伝搬時間差を測定することから、表面弾性波の速度が遅くなるコンクリートでは、入力受信点間距離によって、最初に受信点に到達する振動の種類、速度が変化して、測定上の速度も変化するものと考えられる。

また、表面弾性波の速度  $V_{PS}$  は、表面弾性波の伝搬時間差  $T_p$  が測定される  $L$  の範囲(図-12(a)A1橋台正面側 No.3では  $L=200\text{mm}\sim 600\text{mm}$ )で、式(7)により算出した各弾性波速度  $V_{PS}$  の平均値から判断できる。次に、内部弾性波の速度  $V_{PI}$  は、内部弾性波の伝搬時間差  $T_p$  が測定される  $L$  の範囲(図-12(a)A1橋台正面側 No.3では  $L=650\text{mm}\sim 1000\text{mm}$ )で、各  $L$  と  $T_p$  の式(8)に示す関係式を最小二乗法により求め、 $a$  の逆数から判断できる。さらに、表面からどの程度の深さで速度が変化しているのか、つまり、内部弾性波が伝搬している表面からの深さは、表面弾性波の速度  $V_{PS}$ 、内部弾性波の速度  $V_{PI}$ 、および、内部弾性波の伝搬時間差が測定される最小の  $L$  を  $L_0$  (図-12(a)A1橋台正面側 No.3では  $L_0=650\text{mm}$ )として、式(9)により深さ  $D_E$  を算出して求められる<sup>16),17)</sup>。

$$V_{PS} = L/T_p \quad (7)$$

$$T_p = a \times L + b \quad (8)$$

$$D_E = L_0 \sqrt{V_{PI}^2 - V_{PS}^2} / 2(V_{PI} + V_{PS}) \quad (9)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  は定数である。全測定箇所での表面弾性波の速度、内部弾性波の速度、内部弾性波の伝搬深さの測定結果を表-4に示す。以上のとおり、既設構造物ではコンクリート表面の状況によってはコンクリート表面付近を伝搬する弾性波の速度が内部を伝搬する弾性波の速度よりも遅くなり、入力受信点間距離により測定される速度が異なることがある。ただし、入力受信点間距離を複数点設定して、各距離での測定上の弾性波速度を比較すれば、コンクリート表面と内部の弾性波を区別して、それぞれの弾性波速度を測定でき、さらに、内部弾性波が伝搬するコンクリート表面からの深さを判断することが可能となる。

#### (4) コンクリートの深さ方向の各試験結果の比較

##### a) 実験内容

(3)で述べたように、本実験対象の構造物では、コンクリート表面付近と内部では弾性波速度が異なることが確認された。そこで、以下に示す測定を行い、表面付近

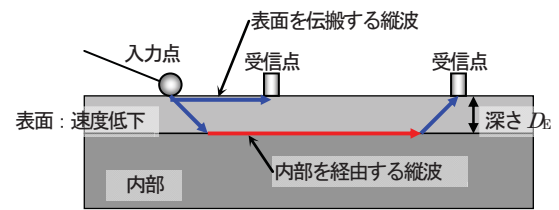


図-13 表面が劣化したコンクリートでの縦波の伝搬状況模式図

表-4 各測定点での弾性波速度の推定結果および測定された弾性波の伝搬深さの推定結果

| 測定部材名   | 測定位置名称 | 表面弾性波速度 (m/s) | 内部弾性波速度 (m/s) | 内部弾性波伝搬深さ $D_E$ (mm) |
|---------|--------|---------------|---------------|----------------------|
| A1橋台正面側 | No.1   | 3278          | 3752          | 78                   |
|         | No.2   | 3640          | 3768          | 26                   |
|         | No.3   | 2873          | 3595          | 109                  |
| A2橋台正面側 | No.4   | 3464          | 3787          | 58                   |
|         | No.5   | 3004          | 3841          | 140                  |
|         | No.6   | 2949          | 3849          | 91                   |
| A2橋台背面側 | No.7   | 4083          |               | 0                    |
|         | No.8   | 4115          |               | 0                    |
|         | No.9   | 3570          | 3997          | 30                   |

と内部での測定結果の相違について検討した。

##### 1) 小径コアによる圧縮強度測定

小径コアは、写真-2に示すとおり、同一箇所でも200mm程度の深さまで採取して、表面付近と内部に分割して圧縮強度を測定した。

##### 2) 透過法による弾性波速度の測定

測定状況を写真-4に示す。採取した  $\phi 142\text{mm}$  のコアの側面で透過法により弾性波の伝搬時間差を測定し、弾性波速度を測定した。測定位置は表面からの深さ20mmから10mm間隔で深さ220mmまでとした。

##### 3) 反発度の測定

測定状況を写真-5に示す。採取した  $\phi 142\text{mm}$  のコアの側面でJIS A 1155によりコンクリートの反発度を測定した。測定位置は表面からの深さ25mmから25mm間隔で深さ200mmまでとした。

##### 4) 接触時間の測定

測定状況を写真-6に示す。採取した  $\phi 142\text{mm}$  のコアの側面を衝撃加速度計(感度  $0.05\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ 、周波数範囲  $0.4\text{Hz}\sim 10\text{kHz}$ )を取り付けたハンマーで打撃し、コンクリートとの接触時間を測定した。なお、ここで測定される接触時間とは、ハンマーとの接触点のコンクリートの弾性係数の指標値であり、弾性係数が大きくなれば接触時間は短くなる<sup>18)</sup>。測定位置は表面からの深さ25mmから25mm間隔で深さ200mmまでとした。

## b) 実験結果

小径コアによる圧縮強度の測定結果を表-5 に、透過法による弾性波速度の測定結果を図-15 に、反発度と接触時間の測定結果を図-16、図-17 に示す。また、(3)での表-4 に示された、表面法による各弾性波の速度と内部弾性波の伝搬深さの測定結果と比較をするため、表-4 に示された結果を図化したものを図-14 に示す。

図-14 より、表面法による弾性波速度は、A1 橋台正面側 No.3, A2 橋台正面側 No.5 では、コンクリート表面からの深さによって変化した。図-15 に示す透過による弾性波速度は、A1 橋台正面側 No.3, A2 橋台正面側 No.5 では、図-14 と同様にコンクリート表面からの深さによって変化した、表面側が遅くなった。なお、透過法での弾性波速度は(3)での表面法による測定結果より速い値となっている。これは、測定上の弾性波速度は入力点と受信点の配置角度によって変化した、表面法と透過法では測定される速度が異なることによる<sup>19)</sup>。

これに対して、表-5 に示した小径コアによる圧縮強度の測定結果では、表面からの深さ 10~60mm で採取したものと、深さ 100mm 以上の位置で採取したものとでは明確な差はない。また、図-16、図-17 に示した反発度と接触時間の測定結果においても、コンクリート表面からの深さによる変化はない。つまり、既設構造物でコンクリート表面付近を伝搬する弾性波の速度が内部を伝搬する弾性波の速度より低下していても、コンクリートの弾性係数や硬度を反映する圧縮強度、反発度、接触時間は、低下していないことが分かった。

この結果から、既設構造物のコンクリート表面付近で測定される弾性波速度が低下する原因は、圧縮強度や弾性係数の低下ではないと考えられる。また、供用中盛土に覆われコンクリート表面付近と内部の含水率の変化が小さいと予想される A2 橋台背面側では、表面付近で測定される弾性波速度が内部と比較して低下していないことから、表面付近で測定される弾性波速度が低下する原因は、既往の研究で確認されているように<sup>20)</sup>、コンクリート表面の乾燥による影響などが考えられる。

### (5) 既設構造物での弾性波の伝搬特性の検討による弾性波速度の測定方法の検討結果のまとめ

既設構造物ではコンクリート表面付近と内部では弾性波速度に相違が生じる場合がある。しかし、表面付近の弾性波速度が低下する原因は、コンクリートの圧縮強度の低下ではなく、含水率の変化などが原因となることが示された。これから、弾性波速度が低下している表面付近で測定された速度は、圧縮強度を推定するための弾性波速度としては用いることができないと考えられる。



写真4 透過法によるコア試験片での弾性波速度測定状況



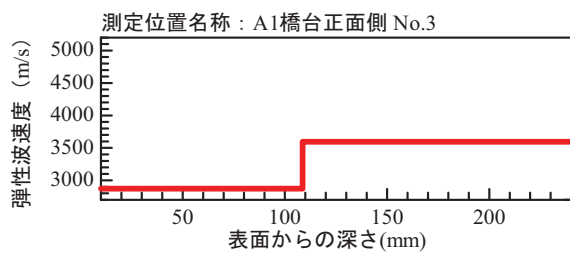
写真5 コア試験片での反発度の測定状況



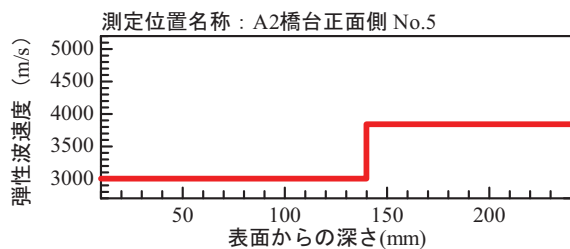
写真6 コア試験片での接触時間の測定状況

表-5 小径コア法による試験結果

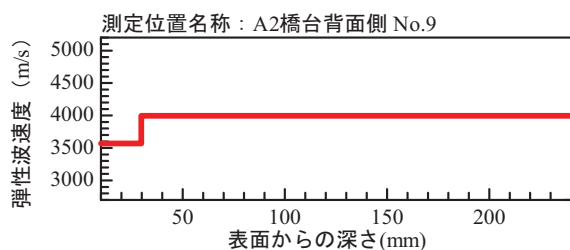
| 測定部材名        | 測定位置名称 | 採取位置<br>※表面からの深さ<br>(mm) | 小径コア<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |      | 単位容積質量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|--------|--------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------|
|              |        |                          | 各測定値                                 | 平均値  |                                |
| A1 橋台<br>正面側 | No.1   | 10~60                    | 37.6                                 | 39.2 | 2366                           |
|              |        | 100~150                  | 40.7                                 |      | 2353                           |
|              | No.2   | 10~60                    | 30.1                                 | 33.7 | 2350                           |
|              |        | 150~200                  | 37.2                                 |      | 2311                           |
| A2 橋台<br>正面側 | No.4   | 10~60                    | 38.9                                 | 34.4 | 2345                           |
|              |        | 100~150                  | 29.9                                 |      | 2325                           |
|              | No.6   | 10~60                    | 46.0                                 | 38.8 | 2375                           |
|              |        | 130~180                  | 31.5                                 |      | 2356                           |
| A2 橋台<br>背面側 | No.7   | 10~60                    | 45.2                                 | 42.9 | 2370                           |
|              |        | 150~200                  | 40.5                                 |      | 2375                           |
|              | No.8   | 10~60                    | 42.8                                 | 40.6 | 2412                           |
|              |        | 100~150                  | 38.3                                 |      | 2341                           |



(a) 測定位置名称：A1橋台正面側No.3

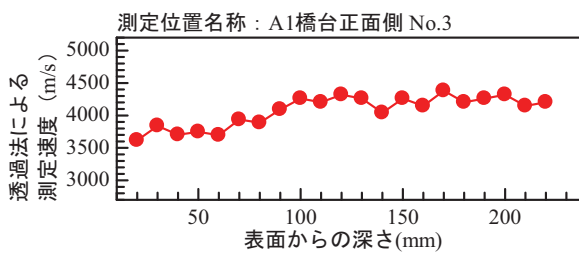


(b) 測定位置名称：A2橋台正面側No.5

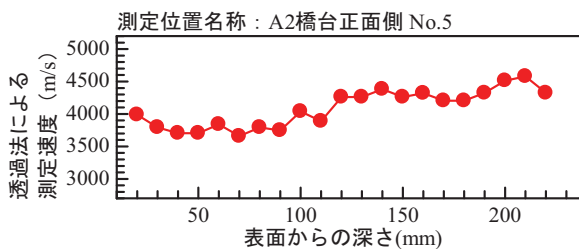


(c) 測定位置名称：A2橋台背面側No.9

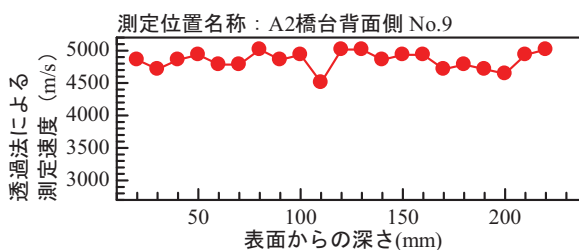
図-14 表面法による弾性波速度の深さによる結果比較



(a) 測定位置名称：A1橋台正面側No.3

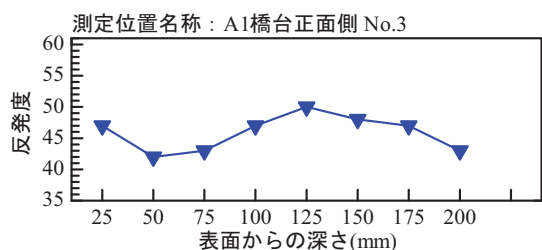


(b) 測定位置名称：A2橋台正面側No.5

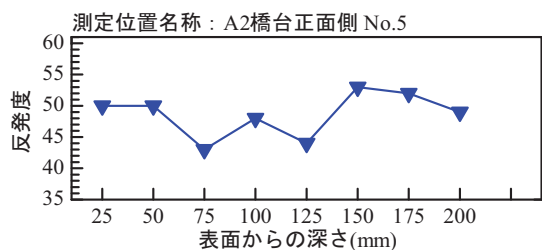


(c) 測定位置名称：A2橋台背面側No.9

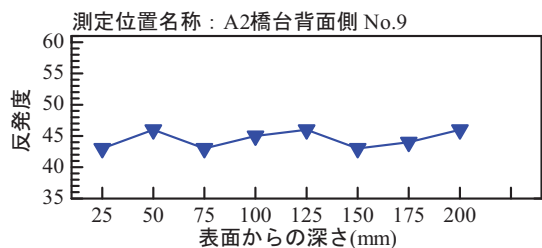
図-15 透過法による弾性波速度の深さによる結果比較



(a) 測定位置名称：A1橋台正面側No.3

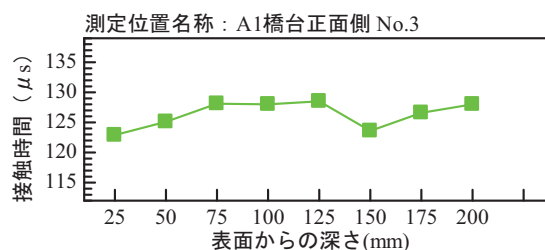


(b) 測定位置名称：A2橋台正面側No.5

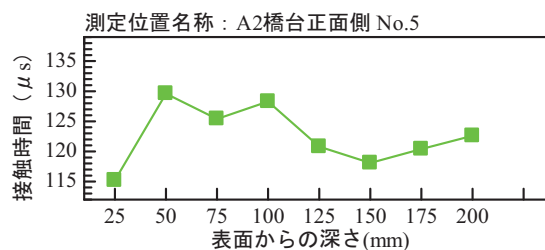


(c) 測定位置名称：A2橋台背面側No.9

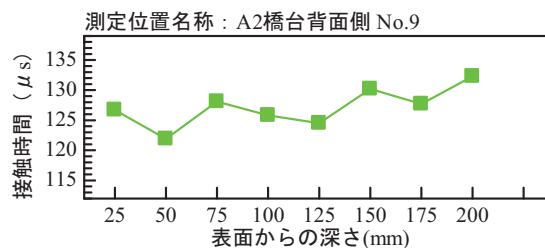
図-16 反発度法の深さによる測定結果比較



(a) 測定位置名称：A1橋台正面側No.3



(b) 測定位置名称：A2橋台正面側No.5



(c) 測定位置名称：A2橋台背面側No.9

図-17 接触時間の深さによる測定結果比較

圧縮強度の推定には、入力受信点間距離を複数点設定して、測定された弾性波の伝搬時間差を比較することが有効であると考えられる。この結果から、コンクリート表面付近と内部での弾性波速度の相違の有無を確認し、相違がある場合には、コンクリート内部の弾性波速度（内部弾性波速度）や弾性波の伝搬深さを判断することが必要であると考えられる。

## 5. 実構造物での圧縮強度の推定方法の検証

### (1) 実験概要

3章、4章の実験結果より、既設構造物での圧縮強度推定手順を考案した。考案した推定手順により、4章の実構造物で測定した弾性波速度と採取した小径コアを利用して、圧縮強度を推定した。また、採取したコアに対する圧縮試験結果との比較により精度の検証を行なった。

### (2) 実構造物での圧縮強度推定手順について

3章での実験結果に基づき、弾性波速度の測定結果と小径コアの採取による圧縮強度から補正比率を求めて、

同一配合のコンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法を考案した。その手順を以下に示す。

- 1) 小径コアを採取する位置で弾性波速度を測定し、式(5)により暫定推定強度 $f_{CT}$ を求める。
- 2) 暫定推定強度 $f_{CT}$ と採取した小径コアの圧縮強度から補正比率 $k$ を求める。
- 3) 任意の位置で弾性波速度を測定し、式(5)により暫定推定強度 $f_{CT}$ を求め、2)により求めた補正比率 $k$ を乗じて補正する。

弾性波速度の測定位置およびコアの採取位置と寸法を表-3に示す。本法は構造物への損傷を少なくするために、補正比率 $k$ を求めるために採取するコアは、 $\phi 25\text{mm}$ の小径コアとすることを想定している。小径コアを採取した6箇所について、1箇所のみを上記の手順1)での小径コアの採取位置と想定し、小径コアを採取した残りの5箇所と $\phi 142\text{mm}$ のコアを採取した3箇所の計8箇所の圧縮強度を推定した。この推定結果と採取したコアの圧縮強度とを比較して、推定精度等を検証した。

### (3) 暫定推定強度と補正比率の算出結果

小径コアを採取した6箇所の弾性波速度の測定結果と

表-6 採取したコアの圧縮強度と暫定推定強度の比較

| 測定部材名   | 測定位置名称 | 内部弾性波速度 (m/s) | 暫定推定強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 小径コアを2本の平均値とした場合              |          | 小径コア2本のうち弾性波の伝搬深さから選択した場合     |          |
|---------|--------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
|         |        |               |                             | 採取コア圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 補正比率 $k$ | 採取コア圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 補正比率 $k$ |
| A1橋台正面側 | No.1   | 3752          | 26.3                        | 39.2                          | 1.49     | 40.7                          | 1.55     |
|         | No.2   | 3768          | 26.8                        | 33.7                          | 1.26     | 37.2                          | 1.39     |
| A2橋台正面側 | No.4   | 3787          | 27.5                        | 34.4                          | 1.25     | 29.9                          | 1.09     |
|         | No.6   | 3849          | 29.9                        | 38.8                          | 1.30     | 31.5                          | 1.05     |
| A2橋台背面側 | No.7   | 4083          | 40.5                        | 42.9                          | 1.06     | 45.2                          | 1.12     |
|         | No.8   | 4115          | 42.1                        | 40.6                          | 0.96     | 42.8                          | 1.02     |

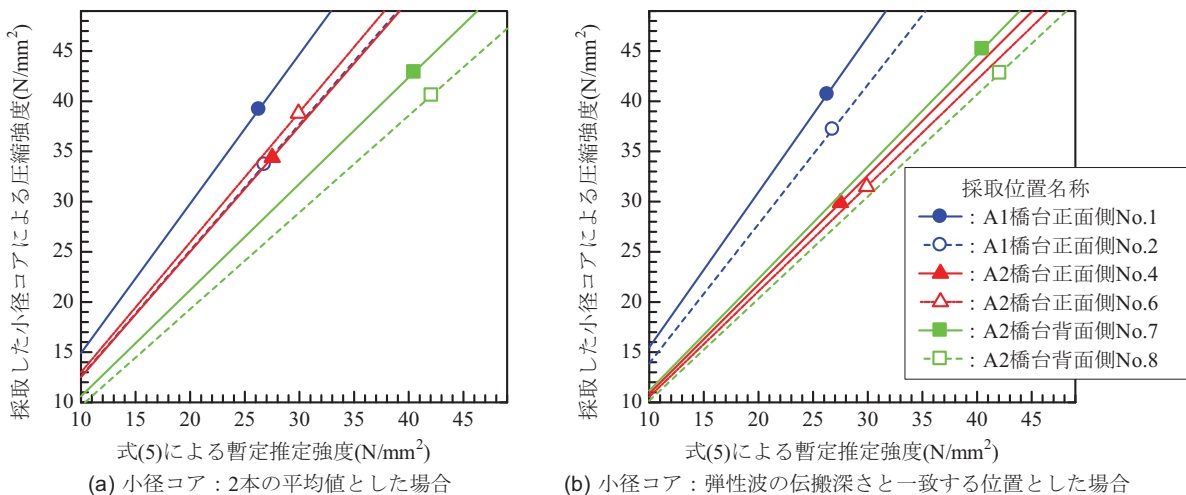


図-18 暫定推定強度と採取した小径コアの圧縮強度

暫定推定強度および小径コアの圧縮強度との比較、補正比率の算出結果を表-6に、暫定推定強度と小径コアの圧縮強度との比較を図-18に示す。

なお、弾性波速度は表-4に示したとおり、測定位置によっては表面付近と内部で異なる結果であったが、4章での実験結果より、内部弾性波速度を採用した。また、採取した小径コアは表-5に示したとおり、深さ200mm程度まで採取して、表面付近と内部に分割した2本で圧縮強度を測定した。これから、暫定推定強度との比較および補正比率の算出は、先ず、表面側と内部の2本の小径コアの平均値を求めて実施した。この結果を図-18(a)に示す。次に、暫定推定強度との比較および補正比率の算出は、表-4に示した内部弾性波の伝搬深さと一致する位置での小径コアの圧縮強度から実施した。つまり、内部弾性波速度の伝搬深さが0mmのNo.7とNo.8では表面側の小径コアの圧縮強度、その他の測定位置では内部の小径コアの圧縮強度とした。この結果を図-18(b)に示す。

表-6、図-18より、同一部材であるA2橋台正面側とA2橋台背面側での補正比率を比較すると、小径コアを2本の平均値とした場合での補正比率は0.96~1.30となった。一方、小径コアを内部弾性波の伝搬深さと一致する位置とした場合での補正比率は1.02~1.12と変動が小さくなった。補正比率の算出は、小径コアを内部弾性波の伝搬深さと一致する位置とする方が、同一配合のコンクリートであれば式(6)に示す関係が成立するという性質に一致する結果となった。

(4) 圧縮強度の推定結果および推定誤差について

小径コアを採取して求めた補正比率により、他の箇所での暫定推定強度を補正し、圧縮強度を推定した。推定結果とコア採取による圧縮強度との比較を表-7、図-19に示す。補正比率を求めるための小径コアは、A1橋台で2箇所、A2橋台で4箇所と2部材から採取したが、図-19(a)は1箇所の小径コアで求めた補正比率から、A1橋台、A2

表-7 各小径コアで求めた補正比率による圧縮強度の推定結果とコアの圧縮強度の比較

| 測定部材名   | 測定位置名称 | 採取したコアの種類 | 内部弾性波速度(m/s) | 暫定推定強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 採取コア圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) | 強度推定式を設定した小径コアの採取位置名称              |      |         |      |         |      |
|---------|--------|-----------|--------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|------|---------|------|---------|------|
|         |        |           |              |                            |                              | A1橋台正面側                            |      | A2橋台正面側 |      | A2橋台背面側 |      |
|         |        |           |              |                            |                              | No.1                               | No.2 | No.4    | No.6 | No.7    | No.8 |
|         |        |           |              |                            |                              | 補正による圧縮強度の推定結果(N/mm <sup>2</sup> ) |      |         |      |         |      |
| A1橋台正面側 | No.1   | 小径コア      | 3752         | 26.3                       | 40.7                         | —                                  | 36.6 | 28.7    | 27.6 | 29.5    | 26.8 |
|         | No.2   | 小径コア      | 3768         | 26.8                       | 37.2                         | 41.5                               | —    | 29.2    | 28.1 | 30.0    | 27.3 |
|         | No.3   | φ142mm    | 3595         | 21.1                       | 41.1                         | 32.7                               | 29.3 | 23.0    | 22.2 | 23.6    | 21.5 |
| A2橋台正面側 | No.4   | 小径コア      | 3787         | 27.5                       | 29.9                         | 42.6                               | 38.2 | —       | 28.9 | 30.8    | 28.1 |
|         | No.5   | φ142mm    | 3841         | 29.6                       | 36.8                         | 45.9                               | 41.1 | 32.3    | 31.1 | 33.2    | 30.2 |
|         | No.6   | 小径コア      | 3849         | 29.9                       | 31.5                         | 46.3                               | 41.6 | 32.6    | —    | 33.5    | 30.5 |
| A2橋台背面側 | No.7   | 小径コア      | 4083         | 40.5                       | 45.2                         | 62.8                               | 56.3 | 44.1    | 42.5 | —       | 41.3 |
|         | No.8   | 小径コア      | 4115         | 42.1                       | 42.8                         | 65.3                               | 58.5 | 45.9    | 44.2 | 47.2    | —    |
|         | No.9   | φ142mm    | 3997         | 36.3                       | 43.3                         | 56.3                               | 50.5 | 39.6    | 38.1 | 40.7    | 37.0 |

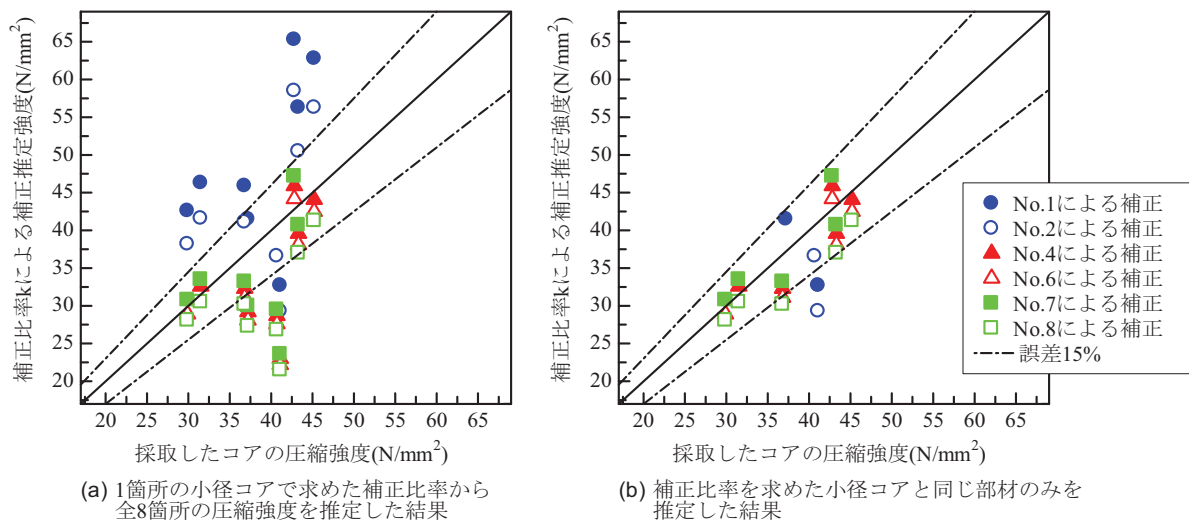


図-19 各小径コアで求めた補正比率による圧縮強度の推定結果とコアの圧縮強度の比較

橋台の2部材の全8箇所の圧縮強度を推定した結果である。これに対して、図-19(b)は補正比率を求めた小径コアと同じ部材の箇所のみを推定した結果である。なお、(3)での実験結果より、補正比率は内部弾性波の伝搬深さと一致する位置での小径コアの圧縮強度から求めた。

表-7より、A1橋台で採取した小径コアの補正比率により、A2橋台の圧縮強度を推定すると、推定強度はコアの圧縮強度よりも大きくなった。一方、A2橋台で採取した小径コアの補正比率を用いて、A1橋台の圧縮強度を推定すると、推定強度はコアの圧縮強度よりも小さくなった。これらにより、図-19(a)では誤差が大きくなる場合があることが分かる。これに対して、図-19(b)より、A1橋台で採取した小径コアの補正比率を用いてA1橋台の他の箇所の圧縮強度を推定した場合と、A2橋台で採取した小径コアの補正比率を用いてA2橋台の圧縮強度を推定した場合は、±15%程度の誤差で圧縮強度を推定できる結果となった。

表-6に示した結果では、A1橋台で採取した小径コアの圧縮強度とA2橋台で採取した小径コアの圧縮強度が同程度であっても、A1橋台での弾性波速度はA2橋台よりも遅くなっている。つまり、A1橋台とA2橋台とでは、弾性波速度と圧縮強度との関係が異なっていることが分かる。以上の結果から、部材が異なれば圧縮強度と弾性波速度の関係は異なる可能性があり、補正比率を求めるために小径コアを採取する部材と、圧縮強度を推定する部材とが異なれば、圧縮強度の推定誤差が大きくなる可能性があるといえる。

#### (5) 実構造物の圧縮強度推定方法の検証結果のまとめ

3章、4章での実験結果より、既設構造物での圧縮強度推定手順を考案した。その手順とは、弾性波速度の測定による暫定推定強度と小径コアの採取による圧縮強度から補正比率を求めて、同一配合のコンクリートで測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法である。推定精度の検証として、採取したコアによる圧縮強度と比較した結果を以下に示す。

- 1) 小径コアは1箇所につき表面付近と内部に分割した2本で圧縮強度を測定した。補正比率を求める小径コアの圧縮強度は、内部弾性波の伝搬深さと一致する位置での結果とすると補正比率の変動が小さくなった。ただし、今回の実験では弾性波の伝搬深さと一致する位置で採取した小径コアは1本のみであったが、推定精度の向上には、参考文献(6)に基づき、小径コアの本数を多く設定する必要があると考えられる。
- 2) A1橋台で採取した小径コアによる補正比率により、A2橋台の圧縮強度を推定した場合、また、A2橋台で採取した小径コアによる補正比率により、A1橋台の圧縮強度を推定した場合には、推定精度が低下する結

果であった。補正比率を求めるために小径コアを採取する部材と圧縮強度を推定する部材とが異なると、圧縮強度と弾性波速度の関係が異なることにより、推定誤差が大きくなる可能性があるといえる。

- 3) 補正比率を求めるために小径コアを採取する部材と圧縮強度を推定する部材とを一致させた場合には、±15%程度の誤差の範囲内で、圧縮強度を推定できることが確認された。

## 6. まとめ

既設構造物にも適用できる圧縮強度の推定方法として、衝撃弾性波法により測定した弾性波速度から圧縮強度を推定する方法と微破壊試験方法である小径コア法とを併用する方法を検討した。得られた見解を以下に示す。

- 1) 呼び強度21～50、セメント4種類による66種類の配合の円柱供試体で弾性波速度と圧縮強度を測定し、両者の関係を確認した。その結果、同じ弾性波速度での圧縮強度は配合によって異なるが、弾性波速度の増加に対する圧縮強度の変化率は配合による変化が小さい。
- 2) 測定した弾性波速度による暫定推定強度と圧縮強度は、同一配合のコンクリートであれば直線比例関係となる。また、両者の関係式の比例定数は、強度推定での補正比率として利用できる。
- 3) 既設構造物で圧縮強度を推定するための弾性波速度の測定では、入力受信点間距離を複数点設定し、測定された弾性波の伝搬時間差を比較して、弾性波の伝搬深さおよび弾性波速度を判断することが必要である。
- 4) 1)～3)より、以下の手順による既設構造物での圧縮強度の推定方法を考案した。
  - i) コアを採取する位置で弾性波速度を測定し、式(5)により暫定推定強度を求める。
  - ii) 暫定推定強度と採取したコアの圧縮強度から補正比率を求める。
  - iii) 任意の位置で弾性波速度を測定し、式(5)により暫定推定強度を求め、ii)により求めた補正比率を乗じて補正する。

建設後43年が経過した既設構造物で、この手順により圧縮強度を推定した結果、±15%の誤差の範囲内で圧縮強度を推定できる結果となった。ただし、補正比率を求めるために小径コアを採取する部材と圧縮強度を推定する部材とが異なると、誤差が大きくなる可能性がある。

本法は一箇所以小径コアを採取することにより、同一部材の任意の箇所の圧縮強度を非破壊で推定する方法である。今回の研究では、呼び強度21～50、セメント4種類の円柱供試体での実験結果に基づき圧縮強度の推定方

法が考案され、コンクリート表面から採取したコアの圧縮強度と比較して±15%程度の誤差となることが確認された。高強度コンクリートなど、今回の66種類の配合のコンクリートに該当しない構造物において、本法が適用できるのかは未確認である。しかしながら、既設のコンクリート構造物の維持管理では、今後、様々な点検手法が採用されていくと考えられるが、これらの点検手法のうち、本法は、コンクリート表面からφ100mmのコアを採取する破壊試験による方法や表面の反発度から圧縮強度を推定する方法と比較して、コア採取による構造物の損傷を最小限に抑え、また、ある程度の精度も期待できる圧縮強度の推定方法になると期待される。

**謝辞：**本実験の一部は、株式会社サンテクノスのご協力により実施致しました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会規格 NDIS 3432：構造体コンクリートと一体成形された供試体の試験方法通則，pp2，社団法人日本非破壊検査協会，2011。
- 2) 土木学会：2010年制定コンクリート標準示方書〔標準編〕硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法（案）（JSCE-G504-2007），pp.283，2010。
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ61 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp.29-31，2004。
- 4) 独立行政法人土木研究所 HP，衝撃弾性波試験（仮称）iTECS法による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006。
- 5) 岩野聡史，森濱和正，極檀邦夫，境友昭：衝撃弾性波法による新設構造物での圧縮強度推定方法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1835-1840，2006。
- 6) 独立行政法人土木研究所 HP，衝撃弾性波試験（仮称）表面2点法による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006。
- 7) 独立行政法人土木研究所 HP，超音波試験（土研法）による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006。
- 8) 国土交通省大臣官房技術調査課：微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測定要領，2012。
- 9) 独立行政法人土木研究所，社団法人日本非破壊検査協会：非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル，pp.105-120，大成出版社，2010。
- 10) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：構造体コンクリートの表面から内部にいたる圧縮強度分布，セメント協会セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.840-845，1997。
- 11) 河野清，田澤栄一，門司唱：新しいコンクリート工学，朝倉書店，1987.5。
- 12) 岩野聡史，森濱和正：コンクリート部材を打撃して得られた振動波形の周波数解析方法に関する検討，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.67，No.2，pp.297-308，2011。
- 13) 岩野聡史，坂本良憲，實藤大夫，森濱和正：弾性波速度測定による既設コンクリートの表面付近の評価方法の検討，日本非破壊検査協会平成23年度秋季大会講演概要集，pp.167-170，2011。
- 14) ASTM-C1383-04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, pp.3-4, 2004.
- 15) 日本非破壊検査協会規格 NDIS 2426-2：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部：衝撃弾性波法，pp.2-4，社団法人日本非破壊検査協会，2009。
- 16) 田治米鏡二：弾性波による地盤調査法，槇書店，1977。
- 17) 独立行政法人土木研究所，社団法人日本非破壊検査協会：非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル，pp.132-141，大成出版社，2010。
- 18) 岩野聡史，森濱和正，極檀邦夫，境友昭：鋼球接触時間の測定によるコンクリート表層部の品質評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.1687-1692，2005。
- 19) 實藤大夫，岩野聡史，坂本良憲，森濱和正：壁部材における弾性波速度測定によるコンクリート内部欠陥探査方法の検討，日本非破壊検査協会平成23年度秋季大会講演概要集，pp.163-166，2011。
- 20) 伊藤順紀，岩野聡史，坂本良憲，森濱和正：衝撃弾性波法による弾性波速度の測定に及ぼす含水量の影響，日本非破壊検査協会平成22年度秋季大会講演概要集，pp.145-148，2011。

(2012.4.23 受付)

# STUDY ON THE ESTIMATION METHOD OF COMPRESSIVE STRENGTH OF STRUCTURAL CONCRETES BY A COMBINATION OF THE IMPACT ELASTIC WAVE METHOD AND THE SMALL DIAMETER CORES METHOD

Satoshi IWANO, Kazumasa MORIHAMA and Tadashi WATANABE

In the test method for estimation of compressive strength of structural concretes by Impact elastic wave method, the velocity of elastic wave is measured and the compressive strength of concrete is estimated from the relational expression which is calculated by relation between the velocity and the compressive strength. In this paper, firstly, to discuss method for calculating the relational expression in structural concretes, the relation between the velocity and the compressive strength in 66 kinds concretes with different mix proportions were investigated. Secondly, to discuss the effect of the measured velocity in established concrete structures, a comparison of various test results was carried out. From the results these experiments, the measuring method for velocity of elastic wave which is applicable to established concrete structures and the correction method for estimated compressive strength of structural concretes were devised. In addition, it was verified that the compressive strengths of structural concretes were estimated within around 15 percent range of error by this devised method.