

非破壊・局部破壊試験によるコンクリート構造物の品質検査に関する共同研究  
 衝撃弾性波 その7 弾性波速度および機械インピーダンスの測定による  
 実構造物での圧縮強度推定

Study on Inspection Method of Concrete Structures Using Non-Destructive Tests  
 Impact Elastic Wave Part7 Estimation of Compression Strength of Concrete Structures by  
 Measuring the Velocity of Elastic Wave and Measuring the Mechanical Impedance

岩野 聡史 リック(株) 森濱 和正 独立行政法人土木研究所  
 Satoshi Iwano RIK Kazumasa Morihama Public Works Research Institute  
 境 友昭 アプライドリサーチ(株) 極檀 邦夫 iTECS 技術協会  
 Tomoaki Sakai Applied Research Kunio Gokudan iTECS Association

概 要

新設鉄筋コンクリート構造物の強度を直接評価する方法として、弾性波速度測定による圧縮強度推定方法を検討している。今回は新設の実構造物で、これまでの検討結果により得られた手順により、圧縮強度を推定する実験を行った。また、簡易な圧縮強度推定方法である機械インピーダンスを測定する方法についても同様の実験を行った。その結果、弾性波速度による推定では、コア採取による圧縮試験結果と概ね 10% 程度以内の誤差となった。機械インピーダンスでは概ね 20% 程度以内の誤差となるが、コンクリートの配合毎に換算式を決定することにより推定精度の向上が期待できる結果となった。

キーワード：衝撃弾性波法，圧縮強度，弾性波速度，機械インピーダンス

1. まえがき

現在、新設鉄筋コンクリート構造物の強度検査は納入されたコンクリートに対しては実施されているが、構造物自体のコンクリート（構造体コンクリートと呼ぶ）に対しては実施されていない。この現状から、筆者らは新設鉄筋コンクリート構造物の構造体コンクリートの強度を直接評価する方法として、衝撃弾性波法での弾性波速度測定による圧縮強度推定方法を検討してきた<sup>1)</sup>。今回は新設の実構造物を対象とし、これまでの検討結果により得られた手順により、圧縮強度を推定して、コア採取による圧縮試験結果と比較する実験を行った。また、簡易な圧縮強度推定方法として、ハンマー打撃によりコンクリートの機械インピーダンスを測定する方法が報告されている<sup>2)</sup>。この方法についても同様の実験を行った。これらの結果を報告する。

表1 実験を実施した構造物

構造物	測定部材	コンクリート種類	
L	P35	床版	27-8-20BB
		柱上部	30-8-20N
		柱下部	30-8-20N
	P36	床版	27-8-20BB
		柱上部	30-8-20N
		柱下部	30-8-20N
	P37	床版	27-8-20BB
		柱上部	30-8-20N
		柱下部	30-8-20N
M	π型 ラーメン橋	橋脚	36-12-20H
		垂直材	36-12-20H
N	PCホロースラブ橋	主桁	36-8-20H
P	橋脚	フーチング	24-8-20BB
Q	橋台	フーチング	27-8-20BB
		堅壁	27-8-20BB
		パラベット	27-8-20BB

2. 実験概要

2.1 実験を実施した構造物

実験を実施した構造物の概要を表1に示す。構造物は5種類で、16部材について実験した。コンクリート種類は6種類である。

2.2 弾性波速度測定による圧縮強度推定方法

推定手順を図1に示す。本測定は、コンクリート中を伝搬する弾性波の速度は、ポアソン比、密度が一定であれば、弾性係数の平方根に比例すること、弾性係数とコンクリートの圧縮強度には正の相関関係があること、より、弾性波速度と圧縮強度には正の相関関係があることが

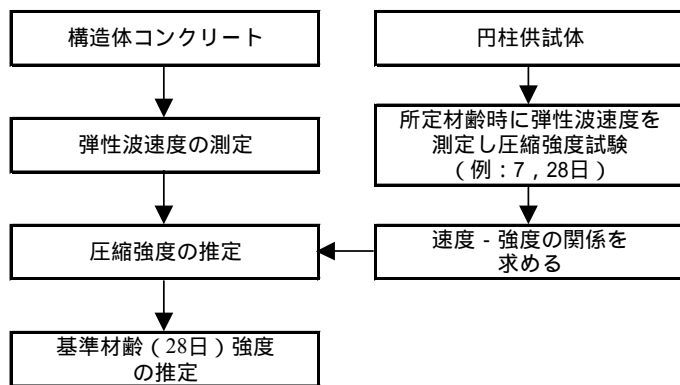


図1 弾性波速度測定による圧縮強度推定手順



写真1 円柱供試体での弾性波速度測定

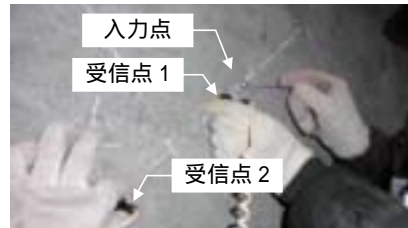


写真2 実構造物での弾性波速度測定

ら，両者の関係式を換算式として，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ものである。

弾性波速度と圧縮強度の関係式は，これまでの実験でコンクリートの配合等により変化することが確認されている<sup>1)</sup>。そこで，各部材でコンクリートの打設時に製作した円柱供試体で，材齢を変化させて測定した弾性波速度と圧縮強度から両者の関係を調査し，換算式を決定することとした。なお，円柱供試体の養生方法は，封緘養生，水中養生，1週間封緘養生後の乾燥養生の3種類，円柱供試体での測定は材齢28日程度までとした。

また，構造体コンクリートでの測定は工程の都合上，若材齢時に実施する場合がある。この場合，強度発現が十分でないことから，ここでの圧縮強度推定結果を構造物の合否判定基準に適用することはできない。そこで，判定基準強度として，28日強度を式(1)の材齢変化による強度変化の予測式<sup>3)</sup>により推定することとした。

$$f_{c28} = \left( \frac{a+bt}{t \times d} \right) \times f'_c(t) \quad (1)$$

ここに， $t$  は材齢（日）， $a, b, d$  はセメントの種類によって変化する係数である。

### 2.3 機械インピーダンス測定による圧縮強度推定

機械インピーダンスは写真3に示すとおり，ハンマー打

撃により，打撃力最大値  $F_{max}$  とハンマーの衝突時速度  $V$  の商を求めて測定する(図2)。ここで求めた機械インピーダンスは，運動エネルギー保存則によりコンクリート表面のバネ係数と比例関係にある。これから，「2.2」に示した弾性波速度と同様に，機械インピーダンスと圧縮強度には正の相関関係があると考えられる。特に，打撃力最大点の後半部分はコンクリートがハンマーを押し戻す時間帯であり，この後半部分の機械インピーダンス値  $Z_R$  は，コンクリート本来のバネ係数，圧縮強度を反映した値となり， $Z_R$  の測定結果から圧縮強度を推定できるものと期待されている<sup>2)</sup>。

しかし，この測定原理では，コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係はコンクリートの配合等により変化することから， $Z_R$  値から圧縮強度への換算式を全てのコンクリートに適用することは困難であると考えた。そこで，「2.2」に示した弾性波速度と同様に，円柱供試体で両者の関係を調査することとした。

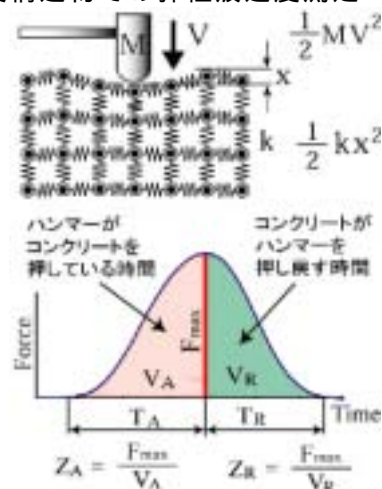


図2 機械インピーダンス測定による圧縮強度推定原理



写真3 実構造物での機械インピーダンス測定

### 3. 実験結果

#### 3.1 円柱供試体による圧縮強度の関係調査結果

円柱供試体による圧縮強度との関係調査結果の一例について、弾性波速度での結果を図3に、 $Z_R$  値での結果を図4に示す。

図3より、構造物Lでの弾性波速度4000m/s程度での圧縮強度は35N/mm<sup>2</sup>程度であるのに対し、構造物Pでは30N/mm<sup>2</sup>程度となり、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は異なることが分かる。また、養生方法を比較すると、封緘養生と水中養生は同一直線上の関係を示すのに対し、封緘後の乾燥養生は異なる場合があるといえる。一方、図4より、 $Z_R$  値では構造物L、Pとも同じ $Z_R$  値が得られても、圧縮強度は10N/mm<sup>2</sup>以上異なる場合がある結果となった。

ここで、封緘養生と水中養生の円柱供試体で測定した弾性波速度 $V_P$ 、 $Z_R$  値とコンクリートの圧縮強度 $f_C$  から、式(2)に示す関係式を直線回帰により求めた結果を表2に示す。

$$f_C = aX + b \quad (a, b: \text{係数}, X: V_P, Z_R) \quad (2)$$

表2より、弾性波速度はコンクリートの圧縮強度と強い相関関係を示し、ここで得られた関係式を、弾性波速度から圧縮強度への換算式として決定できる。一方、 $Z_R$  値の相関係数は低い場合があり、特に、構造物M、Nは負の相関関係で測定原理とは反する結果となった。これから、この結果を $Z_R$  値から圧縮強度の換算式として決定できない結果となった。 $Z_R$  値はコンクリート表面付近のバネ係数を反

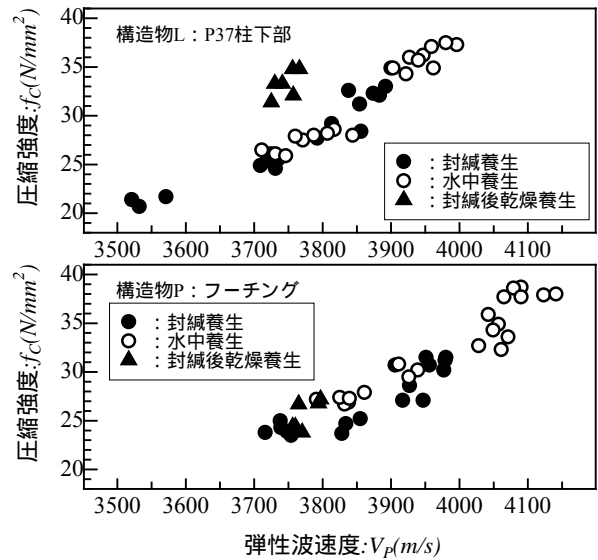


図3 円柱供試体による弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

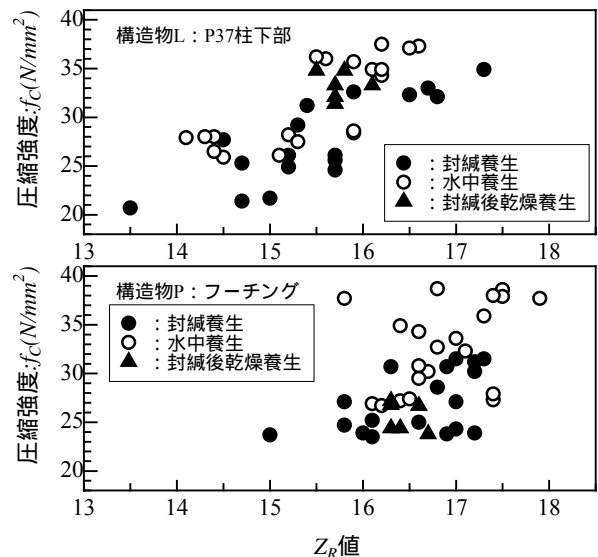


図4 円柱供試体による $Z_R$  値と圧縮強度の関係調査結果

表2 円柱供試体による関係式調査結果

構造物	測定部材	コンクリート種類	弾性波速度と圧縮強度の関係式			$Z_R$ 値と圧縮強度の関係式				
			係数a	係数b	相関係数	係数a	係数b	相関係数		
L	橋脚	P35	床版	27-8-20BB	0.0351	-105.8	0.96	2.98	-18.8	0.49
			柱上部	30-8-20N	0.0392	-123.0	0.96	2.02	-3.3	0.24
			柱下部	30-8-20N	0.0364	-111.8	0.95	1.90	-0.8	0.35
		P36	床版	27-8-20BB	0.0376	-114.0	0.98	4.15	-38.2	0.79
			柱上部	30-8-20N	0.0380	-115.8	0.96	4.96	-48.9	0.74
			柱下部	30-8-20N	0.0395	-124.0	0.98	4.79	-47.9	0.76
		P37	床版	27-8-20BB	0.0363	-110.4	0.97	5.20	-55.6	0.55
			柱上部	30-8-20N	0.0411	-130.9	0.96	0.98	7.9	0.28
			柱下部	30-8-20N	0.0387	-117.8	0.96	4.04	-32.6	0.70
M	π型 ラーメン橋	橋脚	36-12-20H	0.0821	-294.2	0.94	8.91	-109.9	0.68	
		垂直材	36-12-20H	0.0846	-300.3	0.85	-5.90	185.1	-0.57	
N	PCホロースラブ橋	主桁	36-8-20H	0.0622	-193.6	0.97	-5.05	122.6	-0.45	
P	橋脚	フーチング	24-8-20BB	0.0367	-114.1	0.94	4.10	-39.0	0.49	
Q	橋台	フーチング	27-8-20BB	0.0473	-150.6	0.97	6.32	-69.8	0.67	
		豎壁	27-8-20BB	0.0498	-160.1	0.97				
		パラペット	27-8-20BB	0.0467	-149.5	0.97	2.27	-0.1	0.46	

映した値であることから、材齢 28 日までの材齢変化による圧縮強度の変化を利用した本測定方法では、影響が生じた可能性が考えられる。

### 3.2 構造体コンクリートでの圧縮強度推定結果

各構造物、部材の構造体コンクリートで弾性波速度と  $Z_R$  値を測定し、換算式から圧縮強度を推定した。一部の部材で、直径 25mm、70mm、100mm のコアを採取して実施した圧縮試験結果との比較を図 5 に示す。なお、コア採取による圧縮試験は材齢 28 日で実施したことから、弾性波速度と  $Z_R$  値の推定結果では式(1)により 28 日強度を計算して比較した。また、 $Z_R$  値の換算式は過去の実験結果により得られた関係式を用いた<sup>4)</sup>。図 5 より、弾性波速度による推定結果とコア採取による結果との誤差は、特に直径 25mm のコアでは大きくなるが、概ね  $\pm 10\%$  程度以内の誤差となった。 $Z_R$  値による推定結果は、構造物 M ではコア採取による結果との誤差が大きくなるが、概ね  $\pm 20\%$  程度以内の誤差となった。構造物 M では全ての測定点で  $Z_R$  値による推定結果が小さくなるなど、構造物毎に誤差の値が同程度となる傾向が見られる。これは、コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係はコンクリートの配合等により変化することから、過去の実験結果により得られた関係式を換算式として適用した場合には、構造物（配合）によって同程度の誤差が生じるものと考えられる。

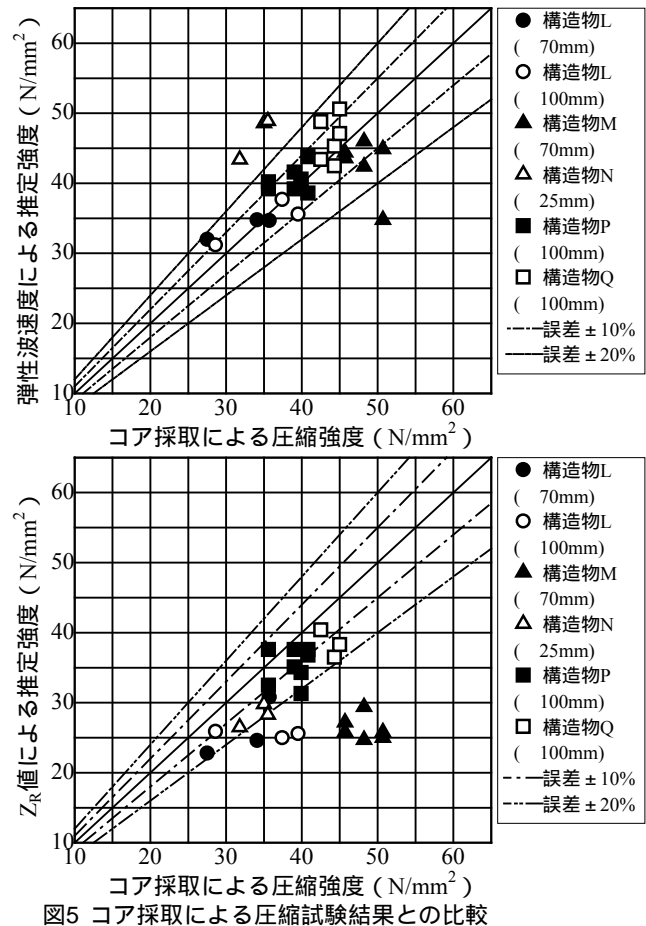


図5 コア採取による圧縮試験結果との比較

### 4. まとめ

新設鉄筋コンクリート構造物の構造体コンクリートの強度を直接評価する方法として、弾性波速度および機械インピーダンスを測定し、実構造物で圧縮強度の推定する実験を行った。その結果、弾性波速度による推定では、材齢 28 日までの円柱供試体で測定した弾性波速度と圧縮強度から換算式を決定することにより、コア採取による圧縮試験結果と概ね 10% 程度以内の誤差で圧縮強度を推定できることが確認された。機械インピーダンスでは、材齢 28 日までの円柱供試体で換算式を決定できない結果となった。これから、過去の実験結果により得られた関係式を換算式とすると、概ね 20% 程度以内の誤差となるが、構造物毎に誤差が同程度となる傾向が見られた。弾性波速度による測定と同様に、コンクリートの配合毎に換算式を決定できれば、さらに推定精度が向上するものと期待される。円柱供試体での測定材齢を長期間とする方法について現在検討している。

参考文献：1)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供試体でのコンクリートの圧縮強度の推定,土木学会第 60 回年次学術講演概要集第 V 部,pp.1159-1160,2005.9

2)極檀邦夫,境友昭：衝撃弾性波法およびインピーダンス法によるコンクリート構造物の非破壊検査技術,日本非破壊検査協会平成 17 年度秋季大会講演概要集,pp.179-180,2005.11

3) (社)土木学会,2002 年制定 コンクリート標準示方書[施工編],pp.52,2002.3

4)久保元樹,極檀邦夫,境友昭,久保元：円柱供試体の圧縮強度と弾性波速度、機械インピーダンスおよび弾性係数の相関関係,土木学会第 60 回年次学術講演概要集第 V 部,pp.1207-1208,2005.9