

# 衝撃弾性波法によるコンクリート強度評価の現状と課題

リック株式会社  
岩野聡史

## 1. はじめに

筆者らは、衝撃弾性波法を用いたコンクリート構造物の非破壊試験について研究をしている<sup>1)2)</sup>。コンクリート構造物は供用年数が経過すれば様々な要因により劣化する性質があり、適切な維持管理が必要であるとされている。その中で衝撃弾性波法は、簡便な測定方法であることからより多くの測定結果が得られること、波長の長い弾性波を利用することから内部の鉄筋・骨材の影響を受けずに適用範囲が広いこと、測定項目が圧縮強度の推定・内部欠陥探査・ひび割れ深さの測定など多項目であること、これらの特長があり、コンクリート構造物の維持管理に有効に利用できるものと期待される。衝撃弾性波法による圧縮強度の推定については、国土交通省による新設橋梁工事を対象とした「微破壊・非破壊試験を用いた品質管理に関する試行」において強度測定の1手法に試行導入されている<sup>3)</sup>。本書では、この様な背景から、本法による圧縮強度の推定手順、実構造物での測定実施例、今後の課題について紹介する。

## 2. 本法での強度測定原理

### 2.1 一般的な強度測定手順

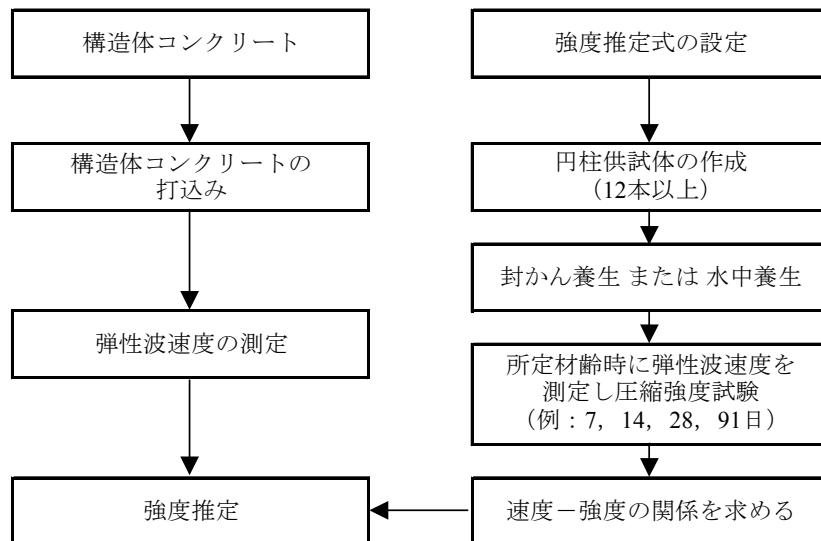


図-1 衝撃弾性波試験 (iTECS 法) による強度推定手順

本法については、国土交通省での「微破壊・非破壊試験を用いた品質管理に関する試行」において、「衝撃弾性波試験 (iTECS 法) による新設の構造体コンクリート強度測定要領 (案)」が提案されている<sup>4)</sup>。一般的な強度推定手順の例として、この要領での強度推定までの手順を図-1に示す。

本法は、①コンクリート中を伝搬する弾性波の速度  $V_p$  は、周知のとおり、弾性係数  $E$  と密度  $\rho$  とポアソン比  $\nu$  により式(1)の関係に示されること、②コンクリートの圧縮強度  $f_c$ 、動的試験法により求めた動弾性係数  $E_D$  には式(2)の関係があると言われていること<sup>5)</sup>、①、②による弾性波速度と圧縮強度の相関関係を利用するものである。調査対象構造物で弾性波速度を測定して、その結果と弾性波速度と圧縮強度の関係式 (以下、強度推定式という) から圧縮強度を推定する。

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

$$E_D = A \cdot f_c^B \quad (2)$$

ここで、 $A$ 、 $B$  はコンクリートの使用材料などによる定数である。

## 2.2 弾性波速度と強度の関係について

本法の測定原理は、前述のとおり測定した弾性波速度から弾性係数を介して圧縮強度を推定するものであるが、式(2)に示されるとおり、弾性係数と圧縮強度の関係式はコンクリートの配合(使用材料)によって変化する。これらから、強度推定式も配合によって変化する事となる。本法において、全てのコンクリートに適用できる強度推定式を設定することは困難であるといえる。

この例として、円柱供試体で弾性波速度を測定し、その後、圧縮試験を行った結果から弾性波速度と圧縮強度の関係を調べた結果を図-2に示す。4種類の配合を混合させた場合には(図-2上図)、両者の相関係数は0.77程度であり、さらに、弾性波速度3800m/sとなる円柱供試体での圧縮強度は約25N/mm<sup>2</sup>~45N/mm<sup>2</sup>と大きな差がある。これに対し、配合別の場合では(図-2下図)、両者の相関係数は高く、同一速度での強度の差も小さいことがわかる。

従って、本法においては、調査対象構造物と同一配合のコンクリートで弾性波速度と圧縮強度の関係、または、弾性係数と圧縮強度の関係を調査し、配合毎に強度推定式を設定することが重要となる。

## 2.3 弾性波速度の測定方法について

調査対象構造物での弾性波速度の測定は、図-3、図-4に示すとおり、コンクリート中に入力した縦弾性波がコンクリート内部を球面状に伝搬する性質を利用して、入力点から受信点までの弾性波の伝搬時間差と距離差の関係から弾性波速度を求める方法を多く採用している。測定波形の例を図-5に示す。また、入力点から受信点までの距離差 $L$ は200mm、300mm、400mm、と100mm間隔で1000mmまで変化させ、9点での測定結果から、弾性波速度を決定することを基本としている。

これは、以下に示すとおり、コンクリートの表面と内部の強度が均一な場合と、既設構造物での表面劣化等により、表面の強度が内部の強度より劣る場合では、距離

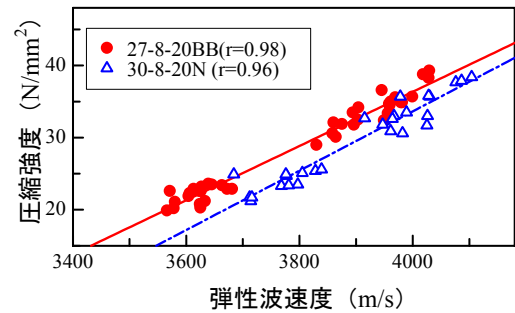
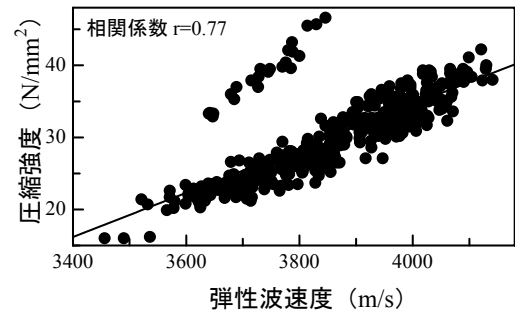


図-2 弾性波速度と圧縮強度の関係比較例  
(上図：配合4種類，下図：配合別)

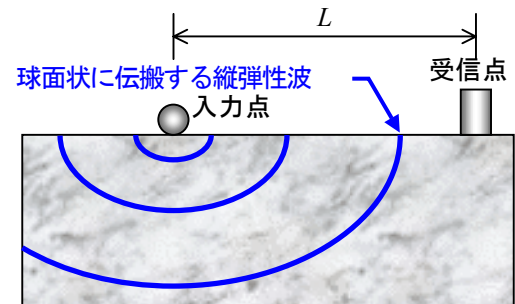


図-3 縦弾性波の伝搬模式図

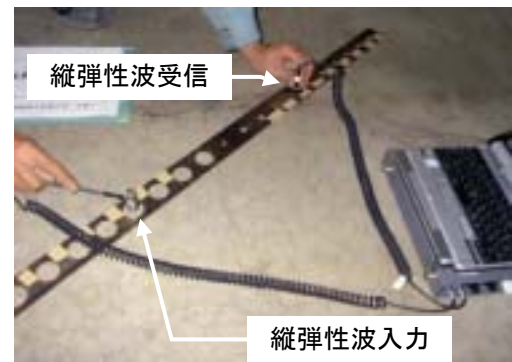


図-4 構造物での速度測定状況

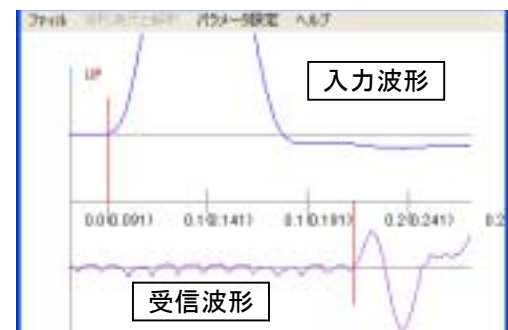


図-5 構造物での速度測定波形例

差によって弾性波の伝搬経路が異なり、弾性波速度の算出方法が異なることを考慮したものである。

### 1) 表面と内部の強度が均一な場合

表面と内部の強度が均一な場合での、各入力・受信点間距離差での伝搬時間差の測定例を図-6に示す。コンクリート表面で入力した弾性波はコンクリート表面を伝搬することから、弾性波の伝搬距離は入力点と受信点の距離差となる。これから、距離差  $L$  と弾性波の伝搬時間差  $T_p$  は、ほぼ一直線の比例関係となり、弾性波速度  $V_p$  は式(3)により算出できる。

$$V_p = L/T_p \quad (3)$$

### 2) 表面の強度が内部より劣る場合

表面の強度が内部より劣る場合での測定例を図-7に、弾性波の伝搬模式図を図-8に示す。本法では、最初に受信点に到達する弾性波の伝搬時間差を測定するが、表面の強度が劣る場合では最初に受信点に到達する弾性波の伝搬経路は、入力点と受信点の距離差  $L$  によって異なることとなる。

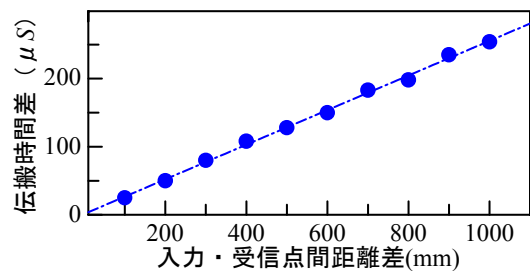


図-6 表面と内部が均一な場合での測定例

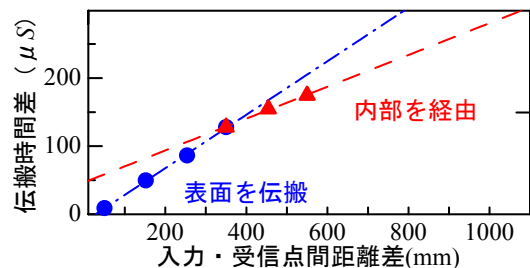


図-7 表面が劣化している場合での測定例

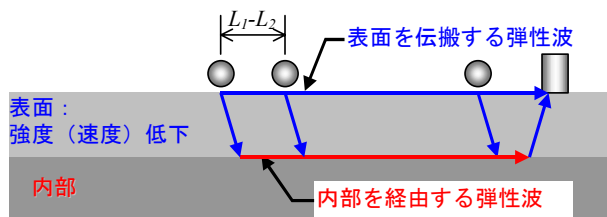


図-8 表面が劣化している場合での弾性波の伝搬模式図

距離差が短い場合には、表面を伝搬する経路が最短であることから、表面を伝搬する弾性波が最初に受信点に到達する。しかし、距離差が一定以上になると、表面を伝搬する弾性波の速度より内部を伝搬する弾性波の速度が速いことから、内部を経由する弾性波が最初に受信点に到達することとなる。従って、表面の強度が内部より劣る場合では、距離差  $L$  と弾性波の到達時間差  $T_p$  の直線比例関係は距離差  $L$  によって2通り存在することとなる(図-7)。

コンクリート内部の強度を推定するには、内部を経由した弾性波が最初に到達する距離2点  $L_1$ ,  $L_2$  で測定した到達時間差  $T_{p1}$ ,  $T_{p2}$  から、弾性波速度  $V_p$  を式(4)により測定することが必要となる。

$$V_p = (L_1 - L_2)/(T_{p1} - T_{p2}) \quad (4)$$

## 3. 実構造物での測定実施例

### 3.1 測定構造物の概要

新設2構造物、既設2構造物での測定結果について報告する。構造物の概要を表-1に示す。構造物A、Bは新設橋梁、構造物Cは既設のRC造マンション、構造物Dは既設のコンクリート舗装版である。

表-1 測定した構造物の概要

構造物名称	構造物概要	部材	コンクリート種類	測定材齢, 供用年数
A	新設橋梁	主桁	H36	35日
B	新設橋梁	底版	BB27	17日
C	既設RC造マンション	壁, 床, 梁	N27	1年半
D	既設コンクリート舗装版		曲げN4.5	6年半

### 3.2 強度推定式の設定結果

強度推定式の設定例を図-9に示す。構造物 A, B では参考文献4)の要領(案), 図-1の手順に基づき, 構造物の打設時に円柱供試体を製作し, 弾性波速度の測定後に圧縮試験を行い, 両者の関係式を指数回帰により求め, 強度推定式を設定した。

構造物 D では, 6年半前の新設時に同様に強度推定式を設定した。

構造物 C では, 圧縮試験用にコアを採取した7箇所 で 2.3 節により弾性波速度を測定し, この結果と圧縮試験結果から両者の関係式を求め, 強度推定式を設定した。なお, 構造物 C では関係式を直線回帰により求めた。式(1), 式(2)より, 弾性波速度と圧縮強度の関係式は原理的には指数関数となるが, データ数が少ない場合などで指数関数の関係が確認されない場合は, 直線回帰としている。

### 3.3 弾性波速度の測定結果および圧縮強度推定結果

各構造物での弾性波の伝搬時間差の測定例を図-10に示す。伝搬時間差と入力・受信点間距離差の関係はほとんどの測定箇所で一直線の比例関係となった。しかし, 既設構造物である D の舗装版4では, 距離差によって比例関係が2通り存在する結果であった。この測定点では, 図-8の模式図に示したとおり, 表面と内部に強度差が生じているものと考えられる。

この結果から, 構造物 D の舗装版4では式(4), その他は式(3)により弾性波速度を求めた。なお, 1測定箇所につき, 複数の入力・受信点間距離差で伝搬時間差を測定しているが, 複数での弾性波速度算出結果を平均化処理して, 1測定箇所での弾性波速度を決定した。

全測定箇所での弾性波速度測定結果および圧縮強度の推定結果を表-2に示す。また, 構造物 A, B, D についてはボス供試体法<sup>6)</sup>, 小径コア法<sup>7)</sup>, φ100mmの標準コア採取による圧縮試験を実施したが, これらの結果との比較を図-11に示す。本法による圧縮強度推定結果は, 他法と概ね±15%の相違であるといえる。

## 4. 本法の今後の期待と課題

### 4.1 既設構造物への適用について

参考文献4)の要領(案)は新設構造物を対象とした測定要領である。既設構造物においても信頼のある

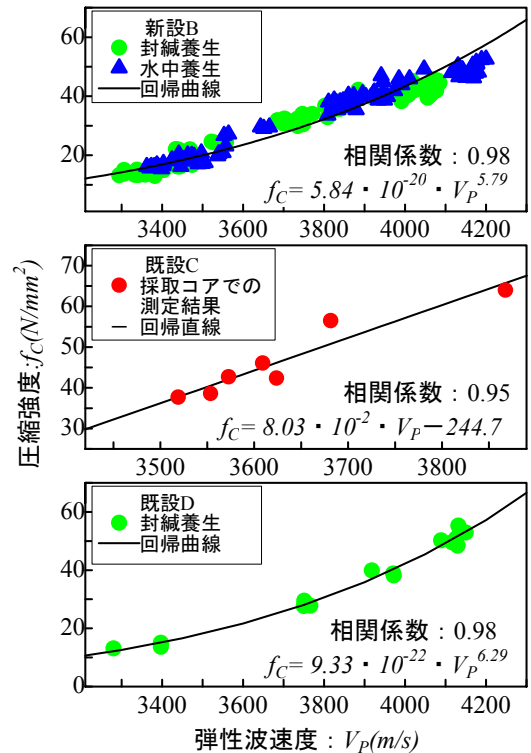


図-9 弾性波速度と圧縮強度の関係調査結果

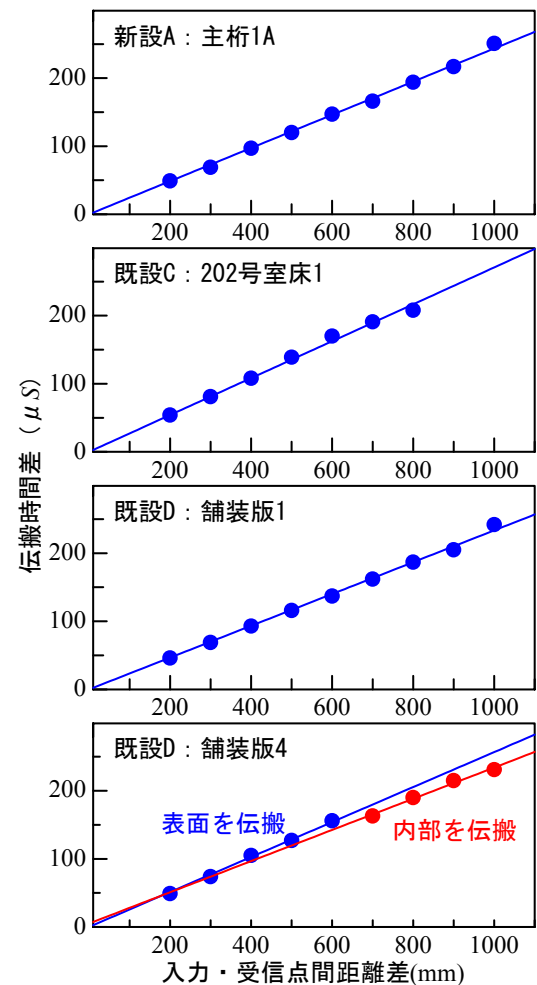


図-10 伝搬時間差測定結果

表-2 弾性波速度測定結果および圧縮強度推定結果

構造物名称	測定位置	弾性波速度 (m/s)	圧縮強度推定値 (N/mm <sup>2</sup> )	構造物名称	測定位置	弾性波速度 (m/s)	圧縮強度推定値 (N/mm <sup>2</sup> )	
新設A 橋梁主桁	主桁1 A	4085	51.8	既設C RC造 マンション	202号	梁	3868	65.7
	主桁1 B	4137	55.4			床	3681	50.8
	主桁1 C	4081	51.6			壁1	3578	42.5
	主桁2 D	4047	49.3			壁2	3683	50.9
	主桁2 E	4101	52.9			603号	梁	3624
	主桁2 F	3994	46.0		床		3519	37.8
	主桁3 G	4035	48.5		壁1		3496	35.9
	主桁3 H	4085	51.8		壁2		3448	32.1
	主桁3 I	4038	48.8		801号		梁1	3807
新設B 橋梁底版	P1 東面	3936	39.5			梁2	3609	45.0
	P1 西面	3886	36.7			床	3554	40.5
	P1 南面	3837	34.1			壁	3563	41.3
	P1 北面	3842	34.3		803号	梁	3573	42.1
	P2 東面	3843	34.4			壁1	3516	37.5
	P2 西面	3798	32.1			壁2	3481	34.7
	P2 南面	3993	42.9	既設D コンクリート 舗装版	舗装版1	4257	62.2	
	P2 北面	3906	37.8		舗装版2	4239	60.6	
			舗装版3		4340	70.3		
			舗装版4		4313	67.5		
			舗装版5		4222	59.1		

推定結果を得るには、この要領に従い、3章での構造物Cのように強度推定式の設定を行うことが重要となる。

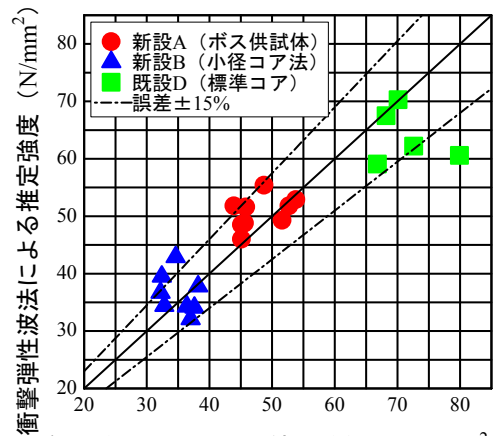
強度推定式の設定は破壊試験であるコア採取を併用するなど、煩雑なようではあるが、1度強度推定式が設定できれば、同一配合のコンクリートであれば、複数箇所でも繰返しの適用が可能になると考えられる。構造物Cでは7本のコアを採取したが、それにより、15箇所でも本法による強度推定が可能となった。3章での構造物Dでは、新設時に強度推定式を設定することにより、供用6年半後での適用が可能となった。

また、強度推定式を設定しない場合では、強度の推定は不可能となるが、各入力・受信点間距離差での伝搬時間差の測定を継続して実施し、測定結果を経年比較することにより、表面劣化の発生の兆候や内部強度低下の兆候などを把握することが可能になると考えられる。さらに、各測定箇所での結果を比較することにより、相対的な強度評価が可能になると考えられる。コンクリート構造物の維持管理におけるコア採取による圧縮強度試験の実施時期や実施箇所の判断に利用するなど、維持管理の適切な対策の判断に利用できるものと期待される。

#### 4.2 測定者について

調査対象構造物での弾性波の伝搬時間差は、図-5に示す測定波形から、測定者が入力時間と受信波形での受信時間を判断して測定する。測定者は図-8に示すような本法における弾性波の基本的な性質を理解し、適切な弾性波の算出方法を判断することが必要となる。また、コンクリートの配合毎に強度推定式の設定を行うことの重要性など、測定者には本法の測定原理、適用条件を理解することが必要となる。

これらから、本法で適切に圧縮強度を推定するには、本法に関する知識、経験が必要であるとい



各試験方法による圧縮試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

図-11 各試験方法での強度測定結果との比較



え、参考文献3)の要領(案)では、講習会の受講が測定者の要件となっている。

## 5. まとめ

衝撃弾性波法による圧縮強度の推定手順、実構造物での測定実施例、今後の課題について紹介した。本法によって信頼のある推定結果を得るには、同一配合のコンクリートにより強度推定式を設定することが重要となる。また、測定者は本法における弾性波の基本的な性質、測定原理、適用条件を理解することが必要となる。コンクリート構造物の適切な維持管理が必要とされている状況において、本法が有効に利用されることを期待したい。

### 参考文献

- 1) 岩野聡史, 森濱和正: 弾性波法によるコンクリートの耐久性評価の試み, 日本非破壊検査協会 非破壊検査第 55 巻 1 号, pp.23-28, 2006.1
- 2) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法を適用した新設コンクリート構造物での圧縮強度推定および内部欠陥探査に関する検討, 日本非破壊検査協会 コンクリート構造物の非破壊検査への展開 論文集(Vol.2), pp.475-482, 2006.8
- 3) 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(案), 2006.5
- 4) リック, 土木研究所, 衝撃弾性波試験(iTECS法)による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), 2006.4
- 5) 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
- 6) 戸田建設, 土木研究所, ボス供試体による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), 2006.5
- 7) 錢高組, 前田建設工業, 日本国土開発, 土木研究所, 小径コア試験による新設の構造体コンクリート強度測定要領(案), 2006.5