

## 衝撃弾性波法(iTECS法)による老朽RC橋梁の非破壊検査

### NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF RC BRIDGE BY IMPACT ECHO METHOD

株式会社 コサカ技研 鈴木拓也  
八戸工業大学 長谷川明  
株式会社 コサカ技研 齋藤修次

56年経過したRC橋梁主桁において、反発度法による推定強度は約 $40\text{N/mm}^2$ 、採取したコアの圧縮強度は $10\text{N/mm}^2$ と大きく異なっていた。採取コアで断面ごとに透過速度を測定した結果、表面は速いが内部は遅い。主桁の多重波は、桁の上面で速く下面に向かって遅くなる傾向が見られ、桁内部を斜めに長距離透過した結果と同様の値を示していたことから、桁内部を把握するためには、斜め透過速度で全体概要を調べ、厚さ測定で多重反射速度を得て速度等高線図で検討する方法が有効と思われる。

キーワード：非破壊検査, 衝撃弾性波法, 老朽構造物, 強度推定

#### 1. はじめに

老朽化した構造物のコンクリート表面は経年劣化が見られること、古い時代の橋梁であれば、建設当時の時代背景から施工品質は必ずしも良いとは言えず、コンクリートの表面に比べて内部の品質が良い、あるいは同等ではないこともある。したがって、構造物を評価するには表面だけでなく内部を評価する調査方法が必要である。衝撃弾性波法による多重反射波を用いた厚さ測定は、打撃によってコンクリート内部を数十回往復する弾性波を周波数解析し厚さを求めるもので、内部の状態を反映させた調査方法である。

そこで本調査では、表面と内部の品質が異なる老朽化した橋梁の主桁に衝撃弾性波法を適用し、1)反発度法との推定強度の違い、2)多重反射波速度と透過弾性波速度の比較、3)採取コアでの深さ方向の透過弾性波速度測定、主桁全体を簡易的に概略評価するための方法として、4)長距離で桁内部を斜めに透過弾性波速度を測定した。これらの結果を報告する。

#### 2. 衝撃弾性波法について

物質を伝搬する弾性波( $V_p$ )は、入力波長よりも部材が数倍大きいとポアソン比を考慮し、部材が小さいとポアソン比は無視するのが普通である。入力波長が40cm程度のハンマーで直径10cm、長さ20cmの円柱を叩いた場合、ポアソン比はゼロと考えると、弾性波速度は(1)式により求められる。弾性波速度は一般的にコンクリートの空隙が多くなると遅くなり、弾性係数は相対的に小さくなる。(1)式から密度を一定と仮定とすると、弾性波速度を求めることは、構造物の弾性係数 $E$ を測定していることに繋がる。弾性係数 $E$ に断面2次モーメント $I$ を乗じることで曲げ剛性となるが、断面2次モーメントは構造物の全断面を対象として計算される。すなわち、曲げ剛性 $EI$ の考え方から、構造物を評価するにあたって、表面だけでなく内部の状態も反映させたものが重要になり、内部を繰り返し反射する多重反射波を測定することが有意になる。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

#### 3. 多重反射速度と透過弾性波速度

多重反射速度は、表面と底面の間で多重反射を繰り返す弾性波の往復時間の逆数となる振動数 $f$ を周波数解析により求め、式(2)を用いることで厚さ $D$ が算出される。ここで、弾性波速度( $V_p$ )は構造物

の弾性波速度を用いるが、式(2)において本調査では主桁の厚さが 450mm で既知、 $f$  は周波数解析によって求められる値であることから、厚さが 450mm になるために必要な弾性波速度( $V_p$ )を逆算で求めることが可能である。ここで、求めた  $V_p$  を主桁の多重反射波速度とした。それに対して、透過弾性波速度は桁内部を 1 回透過した弾性波速度である。内部状態を反映させる点では多重波の方が信頼性は高いが、透過弾性波は長距離でも測定が可能であることから、桁全体の概略調査として有効である。

$$D = \frac{V_p}{2 * f} \tag{2}$$

#### 4. 測定概要

測定対象は供用後 56 年経過した RC 橋梁(萬世橋)である。測定した主桁は高さ 95cm×厚さ 45cm の T 桁である。図 1 に測定位置を示す。主桁の概略調査として実施した長距離斜め透過の測定は平面図のとおり、A2 主桁下端部の上流側を打撃し、打撃位置から 1,2,3,4m とセンサー位置を変えて透過距離を変化させた。多重反射波および透過速度測定位置は側面図に示すとおり、5900mm 区間、100mm×100mm メッシュで、iTECS-06 を使用して測定した。多重波の測定では、センサーとハンマー間隔は 100mm、直径 30mm 鋼球を使用し、鉛直方向に床版から 100mm 下がりをして L1 として L8 まで測定した。

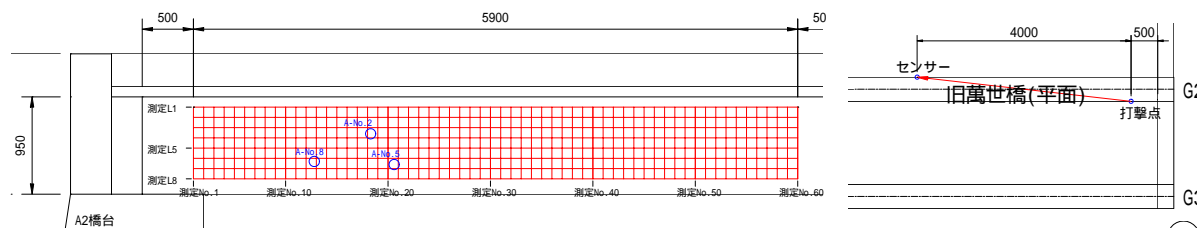


図 1 測定位置(測定メッシュ)

#### 5. 測定結果

##### 5.1 長距離での斜め透過弾性波速度測定

橋梁の概略調査を目的として斜め長距離透過速度を測定した。比較対象として、新設された新萬世橋(透過距離 29.508m) M 橋で測定した結果を表 1 にまとめる。新萬世橋、M 橋ともに 3,800 ~ 4,000m/s 以上の速度に対し、本橋では著しい速度低下に加えて、測定箇所(ライン毎)のバラつきも大きく、主桁上部から下部に向かって速度が低下傾向である。また、本橋で透過距離を 13m まで伸ばしてみたが、図 2 の左図に示すように波形の減衰が大きく、センサー側の立ち上がりを読み取ることが困難であった。

一方、図 2 の右図に示した新萬世橋の測定波形は、萬世橋の 2 倍の透過距離であるのに対して、波形の減衰は見られずに立ち上がりが明瞭な波形であった。本橋が 13m で測定不能になることは、桁の品質に問題があると考えられる。

表 1 長距離透過測定結果

橋梁名(橋齢)	測定部位	透過距離(m)	速度(m/s)
旧萬世橋 G2 (56年)	G2-L1	4.025	3387
	G2-L3		3032
	G2-L5		2714
新萬世橋 (1年)	G1-下フランジ	29.508	4386
	G2-下フランジ		4420
	G3-下フランジ		4418
	G4-下フランジ		4423
	G5-下フランジ		4508
M橋 (33年)	G1-下フランジ	9.703	4248
	G2-下フランジ		4335

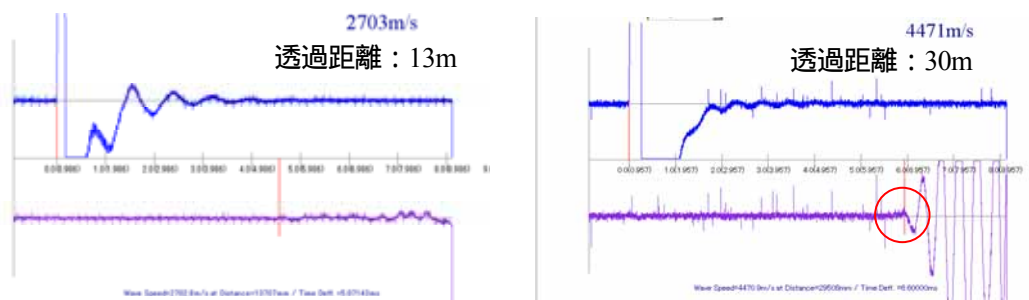


図 2 斜め長距離測定結果の測定波形(左: 萬世橋 右: 新萬世橋)

ここで、本橋の G2 主桁で測定した斜め透過速度測定結果を透過距離ごとに最小二乗法でプロットしたものを図 3 に示す。打撃位置を固定して、センサー位置を 1,2,3,4m と離して桁内部を斜めに透過させ測定した。L1,L3,L5 でそれぞれ測定した結果、ライン毎に平均速度を計算すると、L1 は 3,281m/s , L3,L5 はそれぞれ 2,903m/s , 2,690m/s であった。L5 の傾向が他とは事なり距離が長くなるにつれて速度が低くなっている。これは、L5 の 1.0m の値が極端に高いことが原因であり、同ラインは注意が必要である。このように、桁内部を斜めに長距離透過することによって、桁全体の概略評価につながり、極端な速度低下が見られた場合には、厚さ測定による詳細調査候補とすることが出来る。

### 5.2 厚さ測定結果(ソナー図と MEM スペクトル)

厚さ測定のソナー図を図 4 に示す。上図は L1 , 下図は L8 の測定結果を示している。解析時の  $V_p$  は採取コアの多重波から 3,143m/s である。図中の白線は桁の厚さ 450mm を示しており、L1 では概ね 450mm であるが、測定値が逸脱している箇所もある。一方、L8 は L1 と比較して厚く計測されていることがわかる。L8 は空気に接するため拘束条件による違いも懸念されるが、L1 での計測厚さ約 450mm に対して、L8 では 600mm 前後の測定結果で 33%も厚く計測されている。図 5 に代表的な測点の厚さスペクトルを示す。図 5 の上図(G2-L2-26)は設計厚さ 450mm が明瞭な測点、下図(G2-L6-21)はソナー図上で計測厚さが乱れていた範囲から抽出したものである。厚さスペクトルにおいて、設計厚さ 450mm が明瞭に出ているものに対し、右図はスペクトルが散乱していることがわかる。これは不具合による可能性もあるが、本橋は T 桁であり板構造でないことから、床版付近では形状によるスペクトルの散乱が計測された可能性も考えられる。

### 5.3 ライン毎の多重波速度と透過速度

測定ライン毎の平均速度、変動係数を表 2 に示す。L3,L4,L5 の平均値  $\pm 2\sigma$  の速度を除去した後に計算したライン毎の平均値である。L3-L6 平均で多重と透過を比較すると、透過が多重よりも約 15%増加している。ライン毎の変動係数は多重の方が透過に比べて大きく、橋軸方向で速度がバラついていることを示している。透過は内部を一度通過した波、多重波は数十回往復する波という特性から、桁の品質が悪い本橋において、多重波の方がより多く内部の状態を測定値に反映させていると言える。

以上のように、斜め透過速度の結果、厚さ測定および透過弾性波速度測定の結果が同様の傾向を示していたことから、桁内部を斜め透過で概略的に把握し、そこから厚さ測定による詳細な調査が有効であると考えられる。

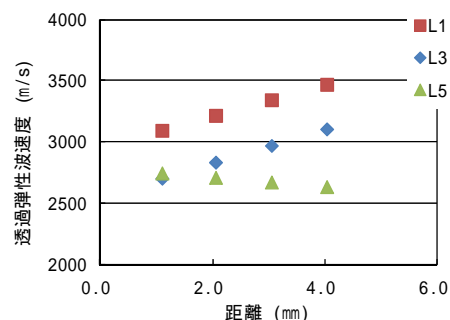


図 3 斜め透過速度測定結果

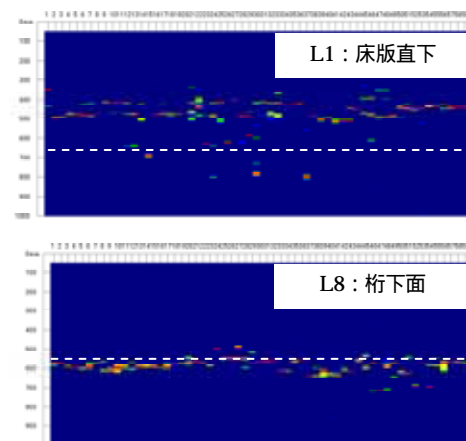


図 4 ソナー図(L1,L8)

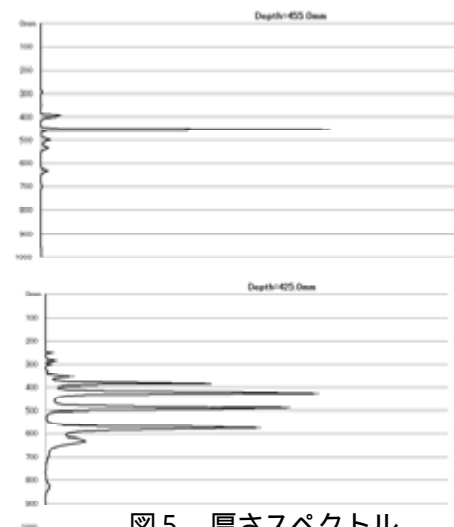


図 5 厚さスペクトル

表 2 弾性波速度一覧表

G2多重	平均速度(m/s)	変動係数(%)	G2透過	平均速度(m/s)	変動係数(%)
L1-Vp	2963	5.9	L1-Tvp	3316	3.8
L2-Vp	2900	5.1	L2-Tvp	3253	4.0
L3-Vp	2835	5.4	L3-Tvp	3202	3.6
L4-Vp	2738	4.5	L4-Tvp	3181	4.1
L5-Vp	2779	6.5	L5-Tvp	3149	3.2
L6-Vp	2716	7.7	L6-Tvp	3158	4.5
L7-Vp	2625	9.9	L7-Tvp	3140	3.8
L8-Vp	2453	4.2	L8-Tvp	3023	3.7
L3-L6平均	2767	5.9	L3-L6平均	3173	3.9

#### 5.4 採取コアでの回帰式を用いた強度推定

G2 主桁で採取したコアの多重反射波速度を測定し、圧縮強度試験値との関係から図 6 に示すような回帰式を作成し、表 2 に示した主桁の多重波 L3-L6 平均値を代入して圧縮強度を推定した。多重反射速度による推定強度は  $8.1\text{N/mm}^2$ 、コアの圧縮強度試験値の  $10.2\text{N/mm}^2$  に近い値を示した。

一方、反発度法では  $47.4\text{N/mm}^2$  と主桁の強度を過剰評価していた。反発度法の結果は桁表面の状態に大きく左右されることから、多重波との差異が生じたものと考えられる。

#### 5.5 円柱コアの深さごとの断面透過速度測定

桁内部の速度分布を把握する目的で、コアで深さごとに断面透過速度を測定した。表面から 10mm 間隔に円柱コアを挟んで測定した結果を図 7 に示す。G2-6 供試体では、表面から内部に向かって低下傾向を示している。傾向から逸脱しているのは多孔質な骨材による影響と思われるが、コアでの透過速度と構造物での速度は概ね一致している。別に作成した(HJ)コアと比較して深さ方向で速度の変動が著しく、本橋梁の桁内部の状態は均質でないことが確認できた。

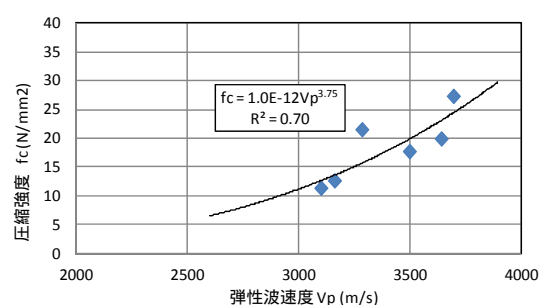


図 6 コアによる Vp-Fc の関係

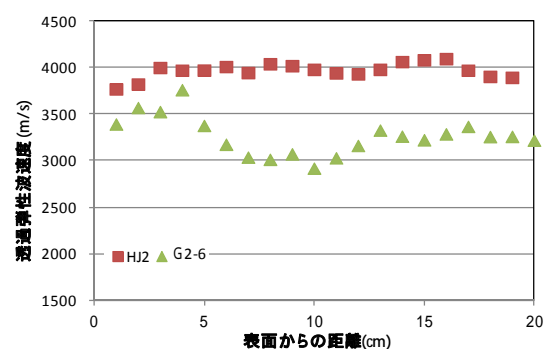


図 7 コアの深さごとの断面透過速度

## 6. まとめ

本調査は桁表面と内部の品質が異なる主桁に衝撃弾性波法を適用したものである。得られた知見を下記に示す。

- 1) 表面近傍と内部が均質でない主桁で強度推定を行う場合、反発度法よりも多重反射波速度を用いた方がコアの圧縮強度試験値に近い値を示す。
- 2) 多重波と透過それぞれにおいて、床版に近い部分では速度が速く、桁下面では遅い傾向であった。拘束条件による違いも考えられるが、最上部と最下部の速度差は多重波で 14～17%、透過で 9～12%以上である。
- 3) 多重弾性波速度を測定することで、水平方向、鉛直方向に速度のバラつきが大きく見られ、桁の面的な強度のバラつきを把握することが可能である。
- 4) 円柱コアの深さ方向の透過速度測定結果から、本橋のコアは表面近傍では速く、内部に向かって低下傾向を示していた。
- 5) 斜め長距離透過弾性波速度測定、厚さ測定および透過弾性波速度測定、それぞれの結果は同様の傾向を示していた。

以上のことから、構造物を内部を反映させた診断方法として、まず始めに長距離透過弾性波による桁内部を斜めに透過させて全体概要を調べ、内部欠陥があった場合には、厚さ測定を実施、多重反射速度を得て速度等高線図等を検討していく方法が有効と思われる。

### [謝辞]

本調査を行うにあたって、青森県三八地域県民局地域整備部から多大な協力を得た。ここに感謝致します。測定および論文作成では iTECS 技術協会 極檀邦夫先生より貴重なご助言ご指導を頂いたこと、ここに感謝致します。