# 論文 打撃点から反射面までの距離が 6m 以上のコンクリートでの衝撃弾 性波法による反射波の測定方法の検討

岩野 聡史\*1·内田 慎哉\*2·大野 健太郎\*3·渡部 正\*4

要旨:本研究では,衝撃弾性波法による反射波の測定方法について,弾性波を入力する打撃点から反射面 までの距離が 6.0m 以上の供試体での方法を検討した。先ず,既往研究で提案されている方法を検討した 結果,今回の供試体は反射波の往復時間に対して測定時間長が十分でないこと,反射波の減衰が大きくな ること,これらから適用が困難であることが確認された。そこで,反射波の伝搬時間に着目し,反射波の 到達による測定振動の振幅の変化をより強調させる新しい測定方法,解析方法を検討した。その結果,こ の方法により前述の影響を除去し,反射波を測定できる可能性が示された。

キーワード:コンクリート,非破壊試験,衝撃弾性波法,反射波

#### 1. はじめに

コンクリートの非破壊試験の一手法に衝撃弾性波法が ある。衝撃弾性波法は、コンクリート表面を鋼球打撃な どにより衝撃を与え、コンクリート中に弾性波を伝搬さ せ、これを加速度計などで測定する手法である。コンク リート中を伝搬する弾性波は、コンクリートの背面や内 部にある空洞などで反射する性質がある。したがって、 反射した弾性波(以下、反射波という)を加速度計など で測定することにより、コンクリートの部材厚さ<sup>1)</sup>や内 部欠陥の有無を評価<sup>2)</sup>することが可能である。

上記のとおり、反射波の測定は、コンクリートの非破 壊試験において極めて有効な手段になるが、反射波のエ ネルギー(振幅)は伝搬距離に応じて減衰(拡散減衰) する性質がある。これにより、例えばコンクリートの部 材厚さが大きくなるなど、反射面までの距離が大きくな るほど、反射波の測定は困難になっていく。筆者らは、 この減衰の影響を除去する方法として相互相関関数を利 用した周波数解析の方法を提案し、部材厚さ、すなわち、 反射面までの距離が2500mmまでのコンクリートに対し て反射波の測定が可能であることを示してきた<sup>3)</sup>。しか しながら、コンクリート構造物にはダム、道路構造物、 電力関連施設など、反射面までの距離がさらに大きくな る構造物も数多く存在する。この様な構造物を想定した 測定方法については、これまで十分な検討が行われてい ないのが現状である。

そこで本研究では,弾性波の入力する打撃点から反射 面までの距離が 6.0, 6.5, 8.0m となる大型供試体を対象 として,著者らの既往の研究に基づく測定方法と,本研 究で新たに提案する測定・解析方法について比較し,提 案手法の適用可能性について検討した。



図-1 使用した供試体(単位mm)

#### 2. 供試体および測定の概要

使用した供試体の形状および測定箇所を図-1 に示す。 供試体は幅 8m, 長さ 6.5m, 高さ 6.0m のボックスカルバ ートを模擬した形状である。測定箇所はこの壁部と底版 部に設定した。壁部では,反射面までの距離が 6.0m とな るよう供試体の高さ方向に弾性波を伝搬させた。底版部

\*1 リック(株) 技術研究所課長 博士(工学)(正会員)
\*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科准教授 博士(工学)(正会員)
\*3 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境学科助教 博士(工学)(正会員)
\*4 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学)(正会員)

では、反射面までの距離が 6.5m となる長手方向と反射面 までの距離が 8.0m となる幅方向の 2 方向で測定した。な お、供試体の弾性波伝搬速度は弾性波の伝搬時間を利用 した方法<sup>4)</sup>により測定し、4130m/s であった。

測定状況を**写真-1** に示す。コンクリート表面に圧電 型加速度計を設置し、そこから 100mm 離隔した点を直 径 76mm の鋼球で打撃した。受信点に設置した圧電型加 速度計の仕様は、感度 10mV/(m/s<sup>2</sup>)、周波数範囲(±3dB) 0.2Hz~20000Hz である。また、測定時間長は 8ms、サン プリング時間間隔は 10μs にそれぞれ設定した。

# 3. 既往の研究で提案されている方法による解析結果 3.1 相互相関関数を利用した周波数解析

鋼球打撃により発生する反射波の伝搬状況の模式図を 図-2 示す。弾性波はコンクリートの入力面と反射面と の間で繰り返し反射し、反射波となる性質がある。した がって、弾性波の入力面に設置した受信点には、反射波 が到達するたびに振動が測定され、受信点で測定する振 動(以下,測定振動という)には、反射波が到達する時 間間隔と一致する周期性が生じることとなる。衝撃弾性 波法には,この性質に着目し,測定振動に対して周波数 解析を行い、得られた周波数スペクトルで振幅が最大と なる周波数(以下,卓越周波数という)の逆数から反射 波の往復時間を測定する方法がある。ただし、コンクリ ートの部材厚さが大きくなるなど反射面までの距離が大 きくなると,反射波の振幅はこの伝搬距離に応じて減衰 する性質がある。したがって、コンクリートの部材厚さ が大きくなるなど反射面までの距離が大きくなった条件 で反射波を測定するには、測定振動に対して減衰の影響 を除去する処置が必要となる。筆者らは、この解析方法 として、式(1)により測定振動の相互相関関数を求め、こ



(a) 高さ方向での測定



(b)長さ方向での測定写真-1 測定状況



図-2 反射波の伝搬状況の模式図



の相互相関関数に対して周波数解析を行う方法(以下, 相互相関法という)を提案している<sup>3)</sup>。

$$R(\tau) = \frac{\sum_{t=t_{1}}^{t_{1}+T} \left\{ y(t) - \overline{y}(t) \right\} \left\{ y(t+\tau) - \overline{y}(t+\tau) \right\}}{\sqrt{\sum_{t=t_{1}}^{t_{1}+T} \left\{ y(t) - \overline{y}(t) \right\}^{2}} \sqrt{\sum_{t=t_{1}}^{t_{1}+T} \left\{ y(t+\tau) - \overline{y}(t+\tau) \right\}^{2}}}$$
(1)

ここに, t: 時刻, y(t): 測定振動,  $\tau$ : 時刻差,  $R(\tau)$ : 時 刻差 $\tau$ での相関係数,  $t_1$ : 振動の開始時刻, T: 測定振動 の第一波の周期の1.5倍程度の時間, y(t): y(t)の振幅の 平均値である。

この方法により,反射面までの距離が2.5m程度までの コンクリートに対して,反射波の往復時間が測定できる ことが確認されている。

今回の供試体で,図-2に示すように受信点を1点として測定し,この解析方法を適用した結果を図-3に示す。なお,周波数スペクトルは,相互相関関数に対して周波数解析をすることにより求めている。周波数解析では周波数分解能を10Hzに設定した。また,図-3には,供試体の弾性波伝搬速度4130m/sと各測定箇所での弾性波の反射深さから想定される反射波の往復時間を算出し,その逆数となる周波数(以下,基本周波数という)foを示している。

得られた周波数スペクトルと基本周波数とを比較する と、基本周波数付近の周波数では振幅値は大きくなって いない。この結果から,反射面までの距離が 6.0m 以上と なる今回の供試体では,相互相関法は適用できないこと が明らかとなった。

相互相関法が適用できなかった原因を検討するため, 弾性波伝搬速度が4000m/s,反射面までの距離が2m~8m のコンクリートでの測定振動の模擬波形を作成し,解析 した結果を図-4に示す。図-4の模擬波形は,鋼球打撃 により周期1msの弾性波が入力され,反射波が各深さで 反射して受信点に到達する度に,入力時に測定された振 動が,振幅が減衰しながらも測定される現象を想定して いる。図-4より,反射面までの距離3mまでは基本周波 数と卓越周波数は一致するが,反射面までの距離4mで は基本周波数の振幅値は大きくなるものの最大とはなら ず,さらに反射面までの距離6m,8mでは基本周波数の 振幅値は小さくなった。

以上のとおり,反射面までの距離が大きくなると相互 相関法が適用できなくなる原因を考察すると,先ずは, 測定時間長が8msであることが影響していると考えられ る。この条件では,反射波の到達回数は反射面までの距 離4mで3回,距離6mで2回,距離8mで1回である。 周波数解析は,反射波の到達により測定振動に生じる周 期性を利用するものであるが,反射波の到達回数が少な くなれば,周期性は生じることなく,解析結果に反映で きなかったものと考えられる。

次に,実際に供試体で測定した図-3(b)の相互相関関



数と図-4 (b)の相互相関関数とを比較すると、例えば、 図-4 (b)の反射深さ 6m では反射波が到達した時刻であ る 3ms と 6ms でのみ相関係数が大きくなるが、実際に供 試体で測定した場合には、反射波が到達した時刻以外で も、複数回、周期的に相関係数が大きくなっていること が分かる。このことから、受信点では反射波以外の波動 による振動も測定されていると考えられる。

以上のとおり,相互相関法は,反射面までの距離が 6m 以上である今回の供試体では,測定時間長の設定条件や 反射波以外の波動の影響により適用できなかったものと 考えられる。

## 3.2 測定振動の振幅の変化に着目した解析方法

衝撃弾性波法により反射面までの距離が大きいコンク リートで反射波を測定する方法として、反射波の到達に よる測定振動の振幅の変化に着目した方法がある<sup>5)</sup>。こ の方法は、横軸:時刻、縦軸:振幅の時刻歴波形である 測定振動には反射波が受信点に到達すれば測定振動の振 幅が大きくなることに着目したものである。測定振動の 振幅が大きくなった時刻が反射波の到達時刻であると推 定し、この到達時刻から反射面までの距離を算出して、 主にコンクリート杭の長さや内部の空洞などの反射面の 有無を探査する方法として利用されている。

ここで、測定振動の振幅の変化を強調するため、図-3 (a)の測定振動の縦軸を拡大した波形を図-5に示す。な お、図-5に示す横軸には、供試体の弾性波伝搬速度 4130m/s と各時刻から計算した反射深さを併記し、また 各測定箇所での反射面までの距離から計算される反射波 の到達時刻を赤色破線で表示している。図-5より、長 さ方向:6.5mでは、反射波が到達した時刻付近を始点と して、測定振動の振幅が大きくなっていることがわかる。 ただし、反射波が到達した時刻以外でも、振幅の大きい 振動が複数測定されており、振幅の変化が反射波の到達 によるものであると客観的に判断することは困難である。 また、高さ方向:6.0m、幅方向:8.0mでは、反射波の到 達による測定振動の振幅の変化は確認できなかった。

測定振動の振幅の変化に着目した方法は,前述のとおり,主に杭に適用されている。棒形状である杭と今回の供試体とを比較すると,今回の供試体では,コンクリート内部に入力された弾性波は同心円状に伝搬するため,拡散減衰により反射波の振幅が小さくなると考えられる。また,図-3(b)の相互相関関数でも同様の現象が確認されたが,反射波が到達した時刻以外でも,受信点には反射波以外の波動による振動が測定されていると考えられる。図-6に示すとおり,鋼球打撃により発生する振動には,反射波以外にもレイリー波などが存在する。したがって,測定振動の振幅の変化に着目した方法では,反射波の減衰が大きく,反射波以外の波動の影響もあるこ





図-6 鋼球打撃により発生する弾性波の模式図

とから,反射波の到達による振幅の変化が顕著にならず, 適用が困難であったと考えられる。

#### 4. 新しい測定方法の検討結果

#### 4.1 本研究で提案する新しい測定方法

3章に示した長さ6.5mでの結果より,限定的ではある ものの,周波数解析を用いずに,反射波の到達による測 定振動の振幅の変化をより強調することが有効であると 考えられる。そこで,本研究では,振幅に着目した既往 の研究<sup>5)</sup>に対して,測定点数や信号処理の方法を改善し た新しい測定方法を提案することにした。

まず、反射波と反射波以外のコンクリート表面を伝搬 する波動とを比較すると、受信点への到達時刻はそれぞ れ式(2)、式(3)となる。

$$F_{\rm P} = \frac{\sqrt{L^2 + 4D^2}}{V_{\rm P}}$$
(2)

$$T_{\rm SF} = \frac{L}{V_{\rm SF}} \tag{3}$$

ここに、*T*<sub>P</sub>:反射波の到達時刻、*L*:打撃点から受信点ま での距離、*D*:反射面までの距離、*V*<sub>P</sub>:弾性波伝搬速度、 *T*<sub>SF</sub>:表層を伝搬する波動の到達時刻、*V*<sub>SF</sub>:表層を伝搬 する波動の伝搬速度である。

表-1 に打撃点から受信点までの距離と各波動成分の 到達時刻の一例を示す。今回の供試体のように反射面ま での距離が 6m 以上となると,打撃点から受信点までの 距離の変化に対する反射波の到達時刻の変化は小さい。 一方,表面を伝搬する波動の到達時刻は打撃点から受信 点までの距離に比例して変化することとなる。なお,表 -1 は反射面までの距離を 6m,弾性波伝搬速度 4130m/s, 表面を伝搬する波動がレイリー波で,さらに,レイリー の伝搬速度が弾性波伝搬速度の0.56倍であると仮定した 結果である。打撃点から受信点までの距離が 100mm か ら 550mm までに変化しても反射波の到達時刻の変化は 微小である。一方,レイリー波の到達時刻は 0.04~0.24ms と距離に応じて顕著に変化する。

本研究では、新たに提案する測定方法として、以上の 性質を利用することを考えた。設定状況を図-7に示す。 既往の研究<sup>3)</sup>での測定方法を参考にして、受信点をコン クリート表面に ch1~ch4 の4点に設定した。さらに、測 定振動の振幅の変化をより強調するために、式(4)に基づ き、各 ch で得られた測定振動の 500µs 間の振幅の積を、 時間帯を変化させて順次求めた。

# 表-1 反射波と反射波以外の波動の到達時刻の例 (反射面まで距離6mの場合)

	打撃点から受信点 までの距離(mm)			
	100	250	400	550
反射波の 到達時刻(ms)	2.91	2.91	2.91	2.91
表面を伝搬する 波動の到達時刻(ms)	0.04	0.11	0.17	0.24



図-7 提案する測定方法(単位mm)



$$M(t) = \sum_{T=t}^{t+500\mu s} \left\{ y_1(T) \times y_2(T) \times y_3(T) \times y_4(T) \right\}$$
(4)

ここに,  $y_1(T) \sim y_4(T)$ は ch1~ch4 の測定振動である。500 $\mu$ s は、加速度波形の第一波が入力された弾性波の周期と判 断し、その周期の 1/2 程度から設定したものである。

式(4)による波形の積が大きくなる時刻は, ch1~ch4 の 測定振動がある程度の振幅値を持ち, さらに符号が一致 している時刻となる。つまり, ch1~ch4 の測定振動に同 じ周期の波形が測定されている時刻でのみ極大値となる。 前述のとおり, 反射波は ch1~ch4 にほぼ同一時刻に到達 することから, 式(4)による波形の積は, 反射波が到達し た場合にのみ極大値になると考えられる。一方, 反射波 以外の波動の到達時刻は ch1~ch4 で異なることから, 各 ch に反射波以外の波動が到達しても, 各波形の積が大き くなることは無いと考えられる。

### 4.2 提案する測定方法による解析結果

提案する測定方法による解析結果を図-8 に示す。図 -8にはch1~ch4の測定振動と式(4)による波形の積を示 している。また,図-5と同様に,式(4)による波形の積 の横軸の上段に反射深さ,赤色破線で反射波の到達時刻 を表示している。なお,式(4)による波形の積のグラフの 縦軸は値の変化を強調するため,縦軸の表示範囲を測定 振動の1/1000 程度としている。

図-8より,高さ方向:6.0m,長さ方向:6.5mでは, 反射波が到達した時刻でのみ波形の積が極大値になった。 幅方向:8.0mでは,反射波が到達した時刻以外でも波形 の積は大きくなるが,この時刻から0.2ms程度遅れて波 形の積が極大値になった。以上の結果より,式(4)による 波形の積は,概ね,反射波の到達時刻において極大値を 示し,提案する測定方法は反射波と反射波以外の波動と の各 ch への到達時刻に関する性質の相違を反映できて いると考えられる。つまり,反射面までの距離 6.0m 以 上のコンクリートでの反射波の測定方法として,提案す る測定方法が適用できる可能性が示されたと考えられる。 ただし,幅方向:8.0mでは測定結果が明瞭ではなかった。 この原因として,適用できる距離が限界以上であること, 供試体の形状が測定結果に影響すること,これらが考え られるが現状では判断ができない。今後の課題である。

# 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

(1) 既往の研究で提案されている相互相関法は、周波数 解析を用いることから測定時間長の設定条件が重要 となる。測定時間長を 8ms と設定して測定した今回 の供試体では、相互相関法は適用できなかった。な お、この設定条件で適用できる反射面までの距離の 上限値は 3m 程度であると考えられる。

- (2) 杭などの構造物に適用されている反射波の到達による測定振動の振幅の変化に着目した方法についても検討したが、今回の供試体では適用できなかった。この原因は、今回の供試体では、コンクリート内部に入力された弾性波は拡散し、反射波の振幅が小さくなること、また、反射波以外の波動による振動が測定されていること、これらであると考えられる。
- (3) 今回の供試体で反射波を測定するには、周波数解析を用いずに、反射波の到達による測定振動の振幅の変化をより強調させることが有効であると考えた。そこで、受信点を打撃点近傍に複数点設けた場合、反射波の到達時刻はいずれの受信点においても同程度の時刻であることに着目し、コンクリート表面の打撃点近傍に受信点を4点設定する測定方法を提案し、さらに、各受信点での測定振動の積を求める解析方法を提案した。その結果、提案する測定方法は、反射波と反射波以外の波動との性質の相違を反映でき、反射面までの距離6.0m以上のコンクリートでの反射波の測定方法として、適用できる可能性が示されたものと考えられる。ただし、適用できる距離の限界などを検証することが今後の課題である。

今後は,実構造物において提案した測定方法を適用し, 本手法の有用性を検証する予定である。

#### 謝辞

本研究の実験に使用した供試体は,鉄建建設株式会社 建設技術総合センター研究開発センター基礎・構造グ ループ 安保知紀様にご提供頂いたものである。ここに記 して謝意を表する。

#### 参考文献

- NDIS 2426-2<sup>:2014</sup>: コンクリートの非破壊試験一弾性 波法―第2部: 衝撃弾性波法,一般社団法人日本非 破壊検査協会, pp.13-18, 2014.9
- 2) 岩野聡史,極檀邦夫,境 友昭:衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査,コンクリート工学年 次論文集, Vol24, No.1, pp.1521-1526, 2002.6
- 3) 岩野聡史,渡部 正,内田慎哉:部材厚さの大きい コンクリートに適用可能な衝撃弾性波法による基 本周波数の測定方法の検討,土木学会論文集 E2(材 料・コンクリート構造), Vol.73, No.2, pp.207-219, 2017.5
- 4) 前掲載1), pp.4-8, 2014.9
- 5) 塩月隆久ほか:高周波衝撃弾性波法による擁壁基礎 杭探査について、土木学会年次学術講演会講演概要 集,第60巻、6号、pp.373-374、2005.9