論文　衝撃弾性波法による部材厚 8m の RC 供試体の反射源可視化への開口合成法の適用

大野　健太郎[*1]・内田　慎哉[*2]・岩野　聡史[*3]

要旨：部材厚 8m の鉄筋コンクリート供試体に衝撃弾性波法を適用し，反射源位置の推定および可視化を目的として開口合成法を適用した。既存の技術では，弾性波の入出力を 1 点入力 1 点受信とし，部材厚が 2.5m の場合には弾性波の入力に直径 145mm の鋼球の使用が推奨されているが，そのような大型の鋼球は取り扱いが容易ではない。本実験では直径 15.1，30，40，63mm の鋼球を用いて弾性波の多点入力多点受信を行い，開口合成法により距離減衰に伴う反射波の振幅低下の影響を低減させることで反射波の位置を可視化した。その結果，実際の部材厚に相当する位置で反射強度が高くなり，本手法の妥当性が示された。

キーワード：鉄筋コンクリート，衝撃弾性波法，反射波，開口合成法

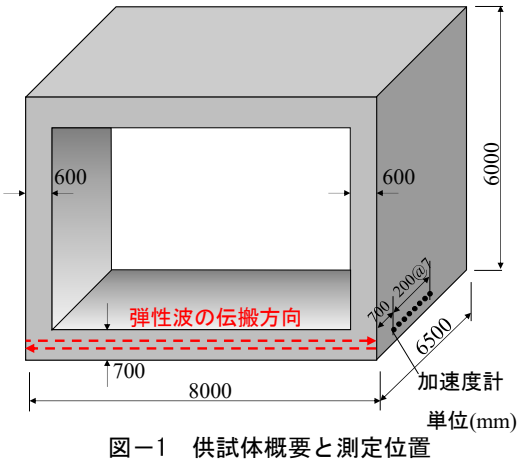
1. はじめに

既設コンクリート構造物のうち，橋台，基礎，ダムなどでは，断面が大きいことに加え，コンクリートが地盤や水などに覆われ，コンクリート表面全てを目視することが不可能な部材および構造物が存在する。これらの構造物に対する部材厚測定や内部欠陥探査には非破壊試験の活用が望まれ，衝撃弾性波法による厚さ評価 [1)]が適用される場合が多い。ここで，文献 1)による厚さ評価方法では，鋼球の打撃面と弾性波の反射源となるコンクリート背面との距離が 2 倍となる波長の振動を鋼球等により励起し，P 波が部材厚に応じた基本周波数で多重反射するように，弾性波の入力装置として鋼球の径を選定することが推奨されている。この方法によれば，部材厚 2.5m の場合，推奨される鋼球径は 145mm（質量 12kg 程度）となる。しかし，部材厚が大きくなるほど推奨鋼球径が大きくなり，大型鋼球の手動による弾性波入力は困難となる。さらに，岩野ら [2)]によれば，反射面までの距離が長い場合には反射波の減衰が著しく，多重反射による基本周波数の特定は困難であることが示されている。その打開策として，弾性波の入力面と同一面にて複数点で信号を受信し，それらの相互相関係数に基づく方法により反射波の減衰の影響を除去した手法も考案されている [3)]。ただし，これらの検討で使用された鋼球は NDIS 規格の推奨鋼球径よりは小さいものの，部材厚 2.5m において鋼球径 76mm が採用されており，更なる小径の適用については検討の余地が残されている。

ここで，受信信号の中の微弱な成分を検出する手法に開口合成法があり，リモートセンシングや電磁波レーダ法，超音波法など多くの分野で適用されている [4)]。開口合成法とは，反射源から到達した微弱な信号を複数の受信点で測定し波形を重ね合わせ，反射源位置を明瞭に表現する手法であり，物理探査の分野では反射法として古くから利用されている。そのため，衝撃弾性波法で得られた信号に対し，開口合成法を適用することで，反射面から到達する微弱な信号を取り出すことが可能と考えられ，NDIS で推奨されている鋼球よりも小さい直径の鋼球で反射位置を特定できる可能性がある。本研究では，反射源までの距離が 8m の鉄筋コンクリート供試体を対象に，弾性波の入力点と同一面に 8 個の加速度計を設置し，直径 15.1，30，40，63mm の比較的小径の鋼球により弾性波を入力し，開口合成法による反射位置の推定を行った。

2. 実験概要

供試体は，ボックスカルバートを模擬した形状であり，**図－1** に示すように幅 8m，長さ 6.5m，高さ 6.0m である。測定箇所は底版部とし，反射面までの距離を 8.0m として弾性波を伝搬させた。弾性波の計測には，圧電型加速



図－1　供試体概要と測定位置

*1 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)
*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 リック（株）　技術研究所課長　博士（工学）　(正会員)

度計（感度 5mV/(m/s^2), 周波数範囲（±3dB）3～10000Hz）を使用し，**写真－1(a)**に示すように弾性波の入力点と同一面において端部から 700mm 離れた位置から 200mm 間隔で 8 個（1CH～8CH）設置した。また，反射源となる背面のコンクリート表面にも同様に端部から 700mm 離れた位置から 200mm 間隔で 8 個（9CH～16CH）設置した（**写真－1(b)**）。なお，加速度計の設置には，ホットメルト接着剤を使用した。弾性波の入力には，直径 15.1，30，40，63mm の 4 つの異なる鋼球をそれぞれ用い，各センサから 50mm 離れた位置をそれぞれ打撃した（**写真－1(c)**）。打撃により生じた弾性波は，サンプリング間隔 1μs にて 8192 個の振幅値データとして記録し，プレトリガ長を 512μs とした。

3. 開口合成法の概要

コンクリート表面で鋼球打撃により入力された弾性波は**図－2** に示すように各センサ位置で入力位置から直接到達した波（直達波）が最初に検出され，その後背面のコンクリートで反射した反射波が各センサで受信される。このとき，コンクリートの弾性波速度を V とし，弾性波の入力点を（Ix_i，Iy_i），検出点の座標を（Ox_j，Oy_j），反射源の座標を（a_k，b_l）とすると，各センサ位置での反射波到達時間 t_{ijkl} は以下の式で表される。

$$t_{ijkl} = \frac{\sqrt{(Ix_i-a_k)^2+(Iy_i-b_l)^2}+\sqrt{(Ox_j-a_k)^2+(Oy_j-b_l)^2}}{V} - \frac{\sqrt{(Ix_i-OIx_j)^2+(Iy_i-OIy_j)^2}}{V} + t_{in} \qquad (1)$$

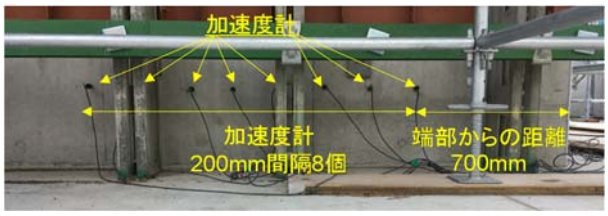
ここに，OIx_j：弾性波の入力点（Ix_i，Iy_i）に最も近いセンサの x 座標（m），OIy_j：弾性波の入力点（Ix_i，Iy_i）に最も近いセンサの y 座標（m），t_{in}：弾性波の入力点に最も近いセンサにおける第 1 波の到達時刻（sec），i =1～N，N：入力点個所数，j = 1～M，M：センサ数，k：計測対象領域の x 方向の分割数，l：計測対象領域の y 方向の分割数であり，本研究では分解能をそれぞれ 14mm および 5mm とした。

これより，反射源の反射レベルは各センサで得られた時間 t_{ijkl} における振幅の和となる。この処理を各打撃点で行い重ね合わせることで，計測対象領域の反射強度が得られる。

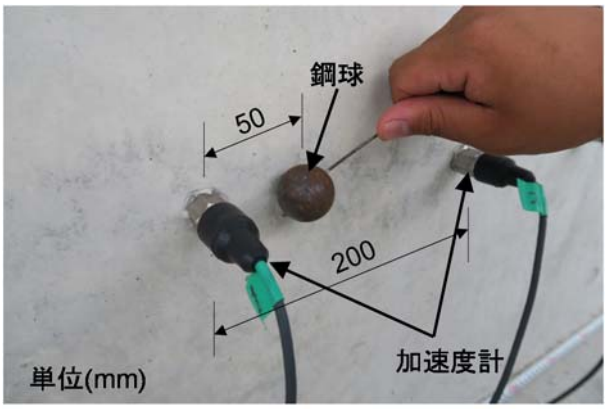
$$\mathrm{R(k,l)} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\frac{A(j,t_{ijkl})}{A_{max}(i)} \qquad (2)$$

ここに，$R(k,\ l)$：計測対象領域の点（a_k，b_l）における反射強さ，$A(j, t_{ijkl})$：弾性波を点（Ix_i，Iy_i）で入力したときのセンサ位置（Ox_j，Oy_j）で信号受信したときの時間 t_{ijkl} における振幅値，$A_{max}(i)$：弾性波の入力点（Ix_i，Iy_i）に最も近いセンサにおける最大振幅値である。

(a)　鋼球打撃面と加速度計

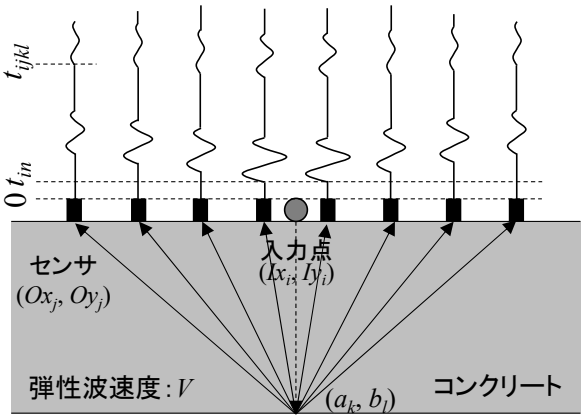


(b)　鋼球打撃面と反対の面に設置した加速度計



(c)　鋼球打撃状況

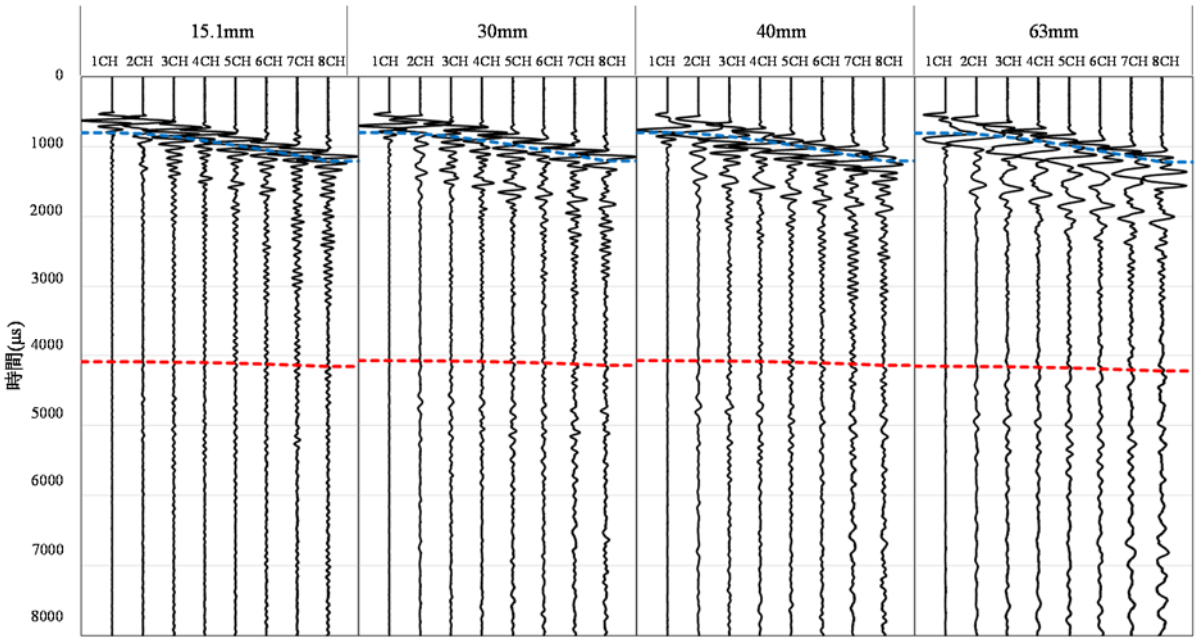
写真－1　センサ設置状況



図－2　弾性波の反射と検出波形の模式図

表－1　表面法の P 波速度と反射波予想到達時間

		鋼球径			
		15.1mm	30mm	40mm	63mm
P波速度(m/s)		4440	4460	4460	4360
反射波予想到達時間(μs)	1CH	4092	4076	4076	4158
	2CH	4094	4078	4078	4160
	3CH	4098	4082	4082	4164
	4CH	4105	4088	4088	4171
	5CH	4114	4098	4098	4181
	6CH	4127	4110	4110	4193
	7CH	4142	4125	4125	4208
	8CH	4159	4143	4143	4226



図－3　1CH 近傍で鋼球打撃したときの検出波形

4. 実験結果および考察

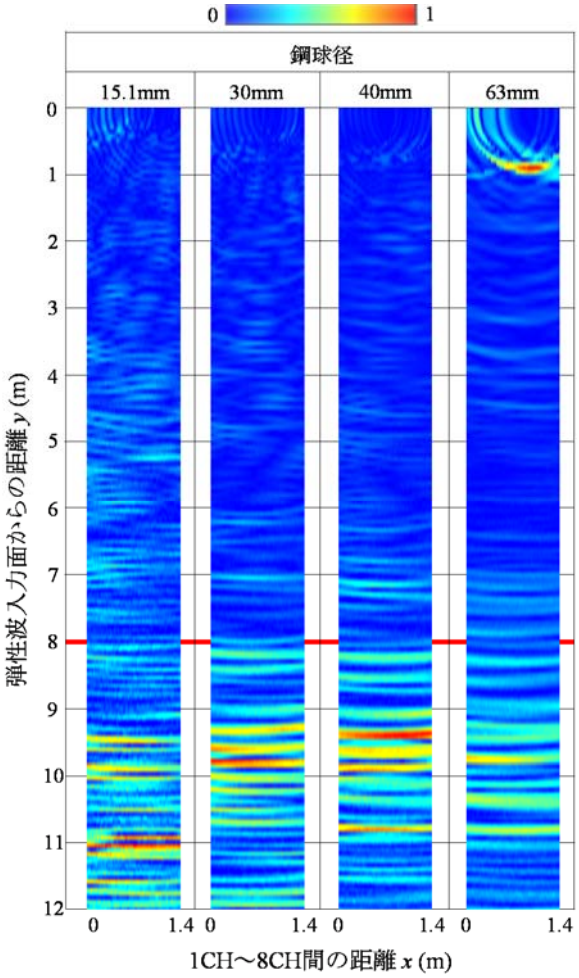
4.1 検出波形

図－3 に 1CH 近傍にて各径の鋼球でコンクリートを打撃した際に同一表面のセンサ（1CH～8CH）で得られた検出波形を示す。なお図中の振幅は，各センサで記録した波形の最大振幅値で正規化した。図より，500～1200μs 程度までにおいて直達波（P 波や表面波）が主に測定されており，時間経過に伴い波形が減衰していることがわかる。ここで，コンクリートを打撃した面と同一面に設置したセンサにおいて，各センサに最初に到達した弾性波の時間差と伝搬距離（打撃点－センサ間距離）から得られた P 波速度を「表面法の P 波速度」と称する。**表－1** に表面法による P 波速度およびその速度から算出される部材厚 8m の反射波予想到達時間を示す。また，**図－3** 中に反射波予想到達時間を赤破線で示す。いずれの鋼球径においても，表面法の P 波速度から計算される理論上の反射波到達時間では，振幅の変化が小さく，**図－3** からは反射波が到達しているかどうか判別がつきにくい。

4.2 開口合成法による反射強度の可視化

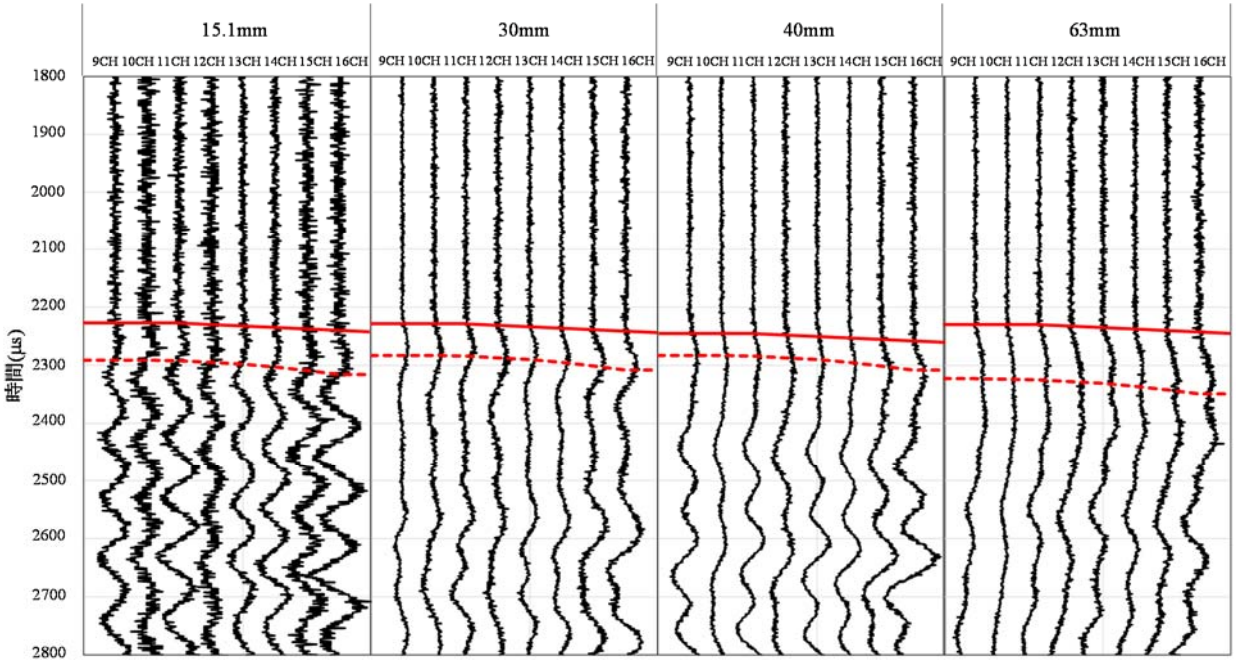
(1) 表面法の P 波速度を対象とした場合

図－4 に表面法の P 波速度を開口合成法に適用し，得られた反射強度の可視化結果を示す。いずれの鋼球径においても弾性波入力面からの距離 8m 位置において，高い反射強度は得られておらず，それよりも長い距離において高い反射強度が現れている。鋼球径 63mm では，1m 付近に高い反射強度が現れており，直達波成分によるものと弾性波の入力面と平行なボックスカルバート壁面（厚さ 0.6m）の反射による影響が現れていると考えられるが，ボックスカルバート壁面による影響であれば，他の鋼球径においても同様の結果が得られるはずである。



図－4　開口合成法の結果（表面法の P 波速度）

これは，ボックスカルバート壁面からの反射波は**図－3** 中において青破線の 800～1250μs の範囲で到達すると想定されるが，この範囲内は打撃により生じた表面波成分が卓越し，表面波と重なり合った微弱な反射波のみを的確に捉えることが困難であったと考えられる。ただし，



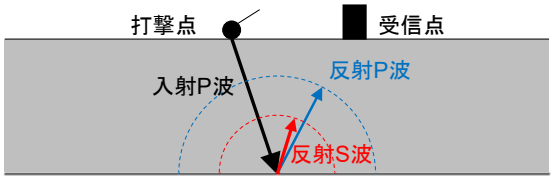
図－5　1CH 近傍打撃時に背面側センサ（9CH－16CH）にて検出した波形の到達部付近拡大図

鋼球径 63mm の波形に着目すると周期が長いために，反射波成分が比較的明瞭に波形に現れたことで，**図－4** の結果が得られたと考えられる。なお，本結果は，ボックスカルバートの底版部に適用したものであるため，側面の反射の影響なども含まれていると考えられるが，伝搬距離が長く，側面の反射の影響が生じにくいマスコンクリートでは生じない現象であると考えられる。

次に，弾性波入力面とは反対のコンクリート表面に設置したセンサで検出された波形の信号到達部付近の拡大図を**図－5** に示す。なお，図中の赤実線は信号到達時間であり，赤破線は**表－1** の表面法の P 波速度を用いて計算した P 波到達時間を示している。コンクリート背面に到達した P 波（赤実線）は**表－1** の速度から算出した時間（赤破線）よりも数十μs 程度はやく到達しているが，**図－4** の計算で使用した表面法の P 波速度はおおむね妥当であることがわかる。ここで，改めて**図－4** の鋼球径 30mm および 40mm の結果を詳細に確認すると，8～8.5m 位置付近に薄青色で表示されたやや高い反射強度が現れており，これらは P 波成分が重なって出現した結果であると推察できる。しかし，この速度を用いた反射位置の推定精度は十分とは考えにくい。これは，P 波成分の振幅が他の成分（例えば，S 波や表面波成分）と比較して小さいために，振幅値を反射強度として捉える本手法では反射強度が高く現れないことに由来すると考えられる。

(2) P 波速度と S 波速度を対象とした場合

弾性波の反射は**図－6** のように模式的に示される。コンクリート表面で P 波が反射する際には，反射の際の境界条件を満たすことができず，必ず反射 P 波と反射 S 波が生じ，かつ，Snell の法則を満たすために反射 S 波の反射角は入射 P 波の入射角と同一とはならないことが知られている [5]。また，S 波成分は P 波成分と比較し，エネルギー（振幅）が大きい。さらに物理探査分野では PS 変換波による地中探査の適用実績が増加している [6]。このようなことから，開口合成法により反射強度を求めるための速度は，P 波速度と S 波速度の平均速度を適用することで所定の反射位置で適切な反射強度を得ることができると考えられる。ここで，S 波速度は P 波速度を用いて以下の式で表される。



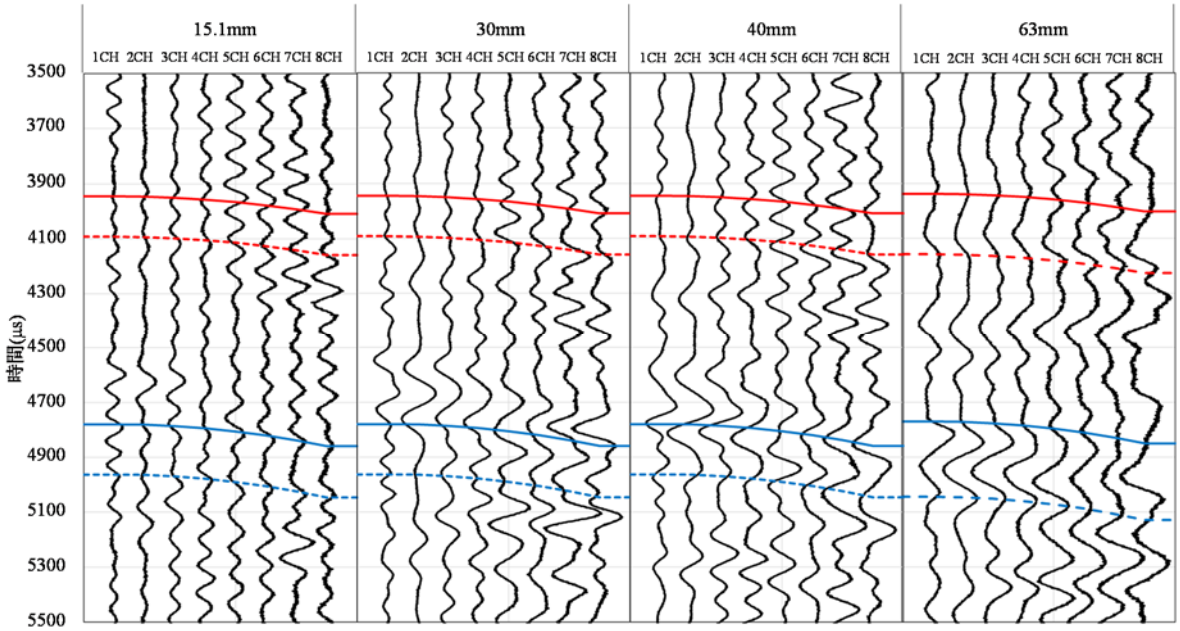
図－6　コンクリート表面での反射の模式図

表－2　入射 P 波と反射 S 波での反射波予想到達時間

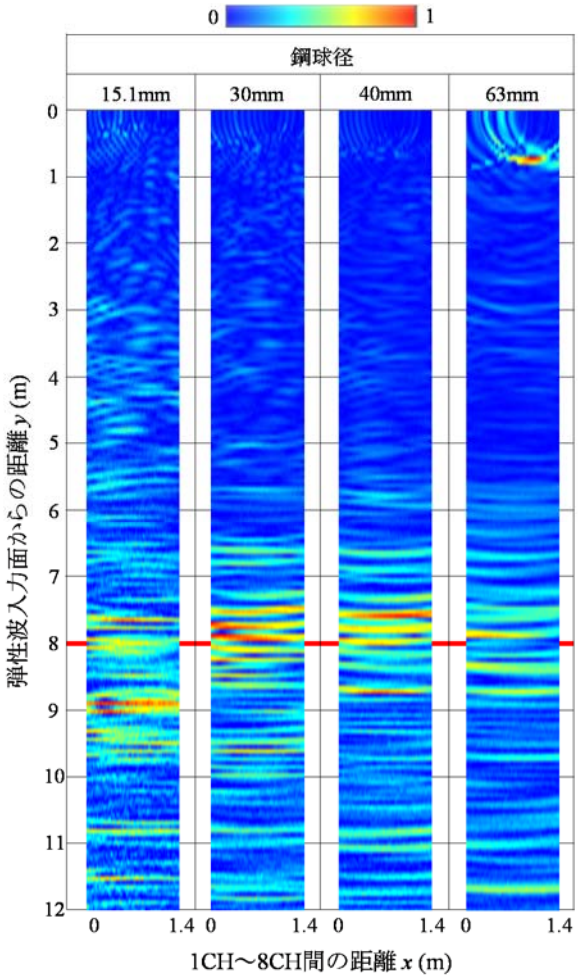
		鋼球径			
		15.1mm	30mm	40mm	63mm
S波速度(m/s)		2708	2721	2721	2660
反射波予想到達時間(μs)	1CH	4963	4942	4942	5044
	2CH	4964	4944	4944	5046
	3CH	4969	4949	4949	5051
	4CH	4978	4957	4957	5060
	5CH	4990	4969	4969	5072
	6CH	5005	4985	4985	5087
	7CH	5024	5003	5003	5107
	8CH	5046	5025	5025	5129

$$V_S = V_P\sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \qquad (3)$$

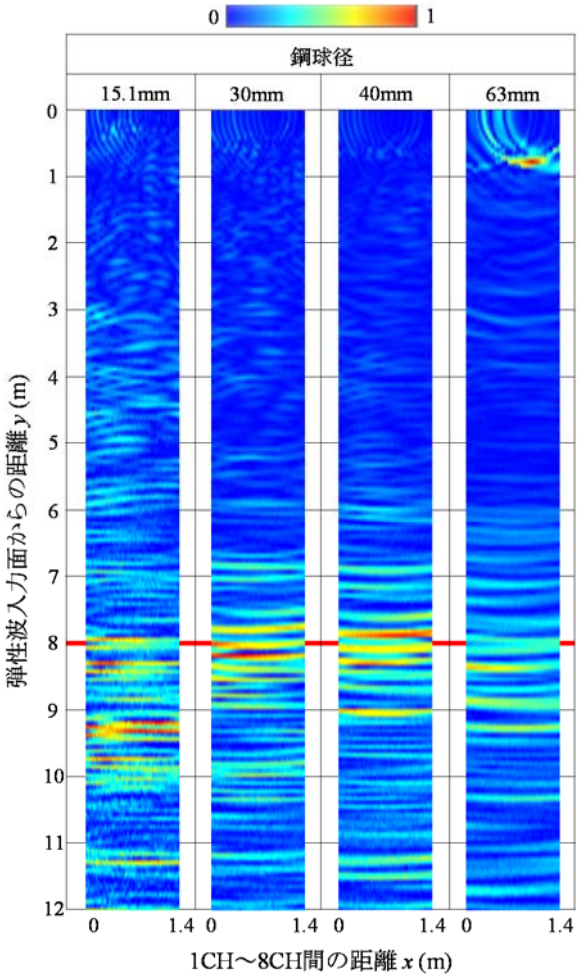
ここに，V_S：コンクリートの S 波速度（m/s），V_P：コンクリートの P 波速度（m/s），ν：コンクリートのポアソン



図－7　反射波到達時刻付近の検出波形拡大図



図－8　表面法から算出した PS 波速度による開口合成法解析結果



図－9　透過法から算出した PS 波速度による開口合成法解析結果

比（本研究では，0.2 とした）である。

式(3)中に表面法の P 波速度を代入して得られた S 波速度を**表－2** に示す。併せて入射 P 波がコンクリート表面で反射し，反射 S 波が各センサに到達する予想時間を示す。また，**図－7** に**図－3** の波形を対象に，3500～5500μs の区間における振幅を拡大して示す。なお，図中には，**表－1** および**表－2** に示される速度で算出した反射 P 波到達時間（赤破線）と反射 S 波到達時間（青破線）を示

している。一方，赤実線および青実線は，透過法から得られたP波速度を用いて，それぞれ反射P波および反射S波の到達時間を示している。

まず，破線の反射P波到達時間と反射S波到達時間を比較すると，反射P波の振幅よりも反射S波の振幅値がいずれの鋼球径においても大きいことがわかる。さらに，鋼球径15.1mmおよび30mmでは確認が難しいが，鋼球径40mmおよび63mmでは，反射P波到達時間（赤破線）よりも反射S波到達時間（青破線）付近において8個のセンサで位相が一致していることがわかる。これより，反射S波が重要な役割を果たしていることがわかる。次に，透過法によるP波速度を用いた反射P波および反射S波の到達時間を比較すると（実線），反射P波では鋼球径63mmの場合，反射S波では鋼球径40，63mmの場合に位相の一致が確認できる。これは，鋼球径が大きくなることでコンクリートと鋼球の接触時間が長くなり，コンクリートに入力される弾性波の周波数が低くなることで拡散減衰の影響が小径の鋼球に比べ小さくなることが要因として考えられる。

(3) 表面法および透過法による速度の影響

これらの条件を踏まえた上で，表面法および透過法から得られたそれぞれのP波速度を用いて，P波速度とS波速度の平均値を使用した開口合成法の結果を**図－8**および**図－9**にそれぞれ示す。これらの結果と**図－4**を比較すると，反射S波を考慮することで高反射強度の位置がコンクリートの厚さに対応することが明確になった。さらに，表面法による速度を用いた結果（**図－8**）よりも透過法による速度を用いた結果（**図－9**）の方が部材厚推定精度が向上することがわかり，部材厚推定時に使用する速度の重要性が改めて確認された。また，鋼球径の違いによらずコンクリート部材厚と高反射強度位置が対応しており，鋼球径の違いが部材厚推定に及ぼす影響は小さいと考えられる。ただし，鋼球径15.1mmの場合では，入力周波数が他の鋼球と比較して高く，拡散減衰の影響を受けやすいと考えられ，本研究の範囲内では直径30mm以上の鋼球を用いて開口合成法を適用することで部材厚が推定可能となることが示唆された。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

(1) 同一表面にて弾性波の入出力を8箇所で実施し，開口合成法により反射波の可視化を試みたところ，表面法から得られるP波速度を用いた場合，実際の部材厚位置での反射強度は比較的小さく，高い反射強度が出現する位置は部材厚よりも大きい位置であることがわかった。これは，P波の振幅値がS波の振幅値などと比較して小さいため，高い反射強度が得られなかったためと考えられる。

(2) 開口合成法における速度の設定を入射P波速度と反射S波速度の平均値を用いることで，部材厚8mの位置で高い反射強度が得られた。したがって，開口合成法により部材厚を推定できることを明らかにした。

(3) 本研究の結果から，NDISで推奨される鋼球直径よりも小さい鋼球を用いて開口合成法を適用すれば，8mの部材厚は推定可能であることが示された。

本研究の成果から，表面法から得られるP波速度は透過法から得られるP波速度よりも僅かに低いことがわかり，部材厚推定では透過法から得られる速度を用いることでより推定精度が向上することがわかった。しかし，実構造物を対象とした場合では，透過法の適用は困難であるため，今後は表面法におけるP波速度の決定方法について検討を深める予定である。さらに，部材厚推定精度については，コンクリートの厚さを変えた実験を追加するなどして検討を継続する必要がある。

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研究センター研究開発センター基礎・構造グループの安保知紀様にご提供いただいたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) NDIS2426-2:2014：コンクリートの非破壊試験－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，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.297-308，2011.6
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) 例えば，岩立次郎，田中雅人，舘石和雄，三木千壽：回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み，土木学会論文集，No.507／I-30，pp.121-127，1995.1
5) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（第2版），森北出版，pp.80-83，2005.8
6) 赤間健一，川中卓：PS変換波を用いた地震探査，石油技術協会誌，Vol.74，No.3，pp.247-251，2009.5