

論文 空間自己相関法で算出した表面波位相速度に基づき作成したバーチャルコアとそれを用いた劣化深さの評価手法

青沼 拓朗*1・内田 慎哉*2・桃木 昌平*3・村上 慧*4

要旨: 本研究では、表面からの劣化深さが異なる 3 体のコンクリート供試体を対象にして、鋼球および鉄製チェーンにより振動を与え、地盤構造の推定に用いられる空間自己相関法から表面波位相速度を推定し、これと波長との関係からバーチャルコア（深さ方向の表面波位相速度の分布）を求めた。その結果、鋼球による計測から得られたバーチャルコアは、実際の劣化状況と概ね一致することが明らかになった。したがって、地盤構造の推定に用いられている空間自己相関法は、コンクリート分野でも適用でき、しかも劣化深さを評価する手法として適用可能であることもわかった。

キーワード: 劣化深さ、非破壊試験、空間自己相関法、表面波、位相速度、バーチャルコア

1. はじめに

コンクリートの劣化には、例えば、凍害、化学的侵食および火害がある。いずれも表面から内部へと、微細なひび割れが発生あるいは多孔質化が進行する劣化である。そのため、劣化の進行程度を把握するには、ひび割れや多孔質化されたコンクリート表面からの深さを適確に把握する必要がある。このような背景に対して、現状の実務の場面では、コアを削孔し、コア側面あるいはコア孔を観察することで劣化の進行を判断しているのが現状である。しかしながら、この方法は破壊を伴う調査のため、適用範囲が限定される。そのため、コンクリートを破壊せず、何か所でも何度でも調査可能な非破壊試験手法が求められている。

そこで本研究では、表面からの劣化深さが異なる 3 体のコンクリート供試体に対して、鋼球および鉄製チェーンにより振動を与え、地盤構造の推定に用いられる空間自己相関 (SPAC : Spatial Auto-Correlation) 法から表面波位相速度を推定し、これと波長との関係からバーチャルコア（深さ方向の表面波位相速度の分布）を求め、劣化深さを評価する手法としての適用可能性について検討した。

2. 空間自己相関法 (SPAC 法)

空間自己相関法は、地盤の常時微動を計測し、その波形に含まれる表面波の位相速度を求める手法¹⁾である。表面波は、位相速度が波長によって変化する分散性という特性があり、波長に相当する深さごとに位相速度を求めることで、地盤の多層構造を推定できる (図-1)。この表面波位相速度を、比較的少ない数の加速度センサ

で求められるのが空間自己相関法である。以下に、この手法の特徴を示す。

2.1 加速度センサの配置と評価可能な深さ

空間自己相関法による加速度センサの設置例を図-2に示す。図に示すように、円の中心に 1 個と同円周上に等間隔に 3 個、合計 4 個のセンサを設置する。なお、この空間自己相関法における波長は、センサを設置した円の半径の 2 倍から 10 倍までが対象となる²⁾。言い換えれば、評価可能なコンクリート表面からの深さは、円の中心のセンサから円周上のセンサまでの距離 (円の半径) によって決定される。

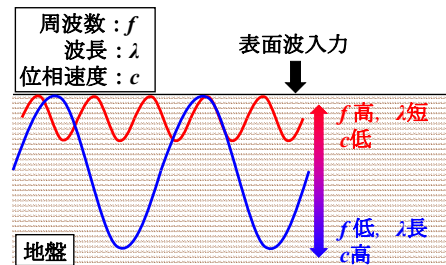


図-1 表面波位相速度の分散性 (地盤の断面図)

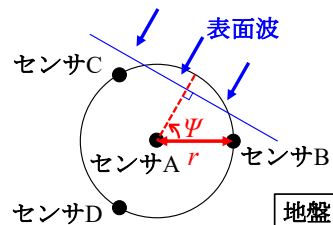


図-2 空間自己相関法による加速度センサの設置 (地盤の平面図)

*1 富山県立大学大学院 工学研究科環境・社会基盤工学専攻 (学生会員)

*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 飛鳥建設 (株) 技術研究所 博士 (工学)

*4 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科

2.2 表面波位相速度の算出方法

空間自己相関法による周波数ごとの表面波位相速度の算出方法²⁾を説明する。図-2に示すように、円の中心位置のセンサAと半径 r 離れた円周上のセンサBについて、特定の方向から伝搬してくる表面波を仮定する。センサAおよびBで観測された波形に対してフーリエ変換したものを次のように示す。

$$X_A(f) = U_A(f) \exp(-i\phi_A(f)) \quad (1)$$

$$X_B(f) = U_B(f) \exp(-i\phi_B(f)) \quad (2)$$

ここで、 f : 周波数(Hz)、 $X(f)$: フーリエ変換後のスペクトル、 $U(f)$: 周波数 f における振幅、 i : 虚数、 $\phi(f)$: 周波数 f における位相、下添字は観測点を表す。なお、本研究におけるフーリエ変換では、波形全体に対して行うフーリエ変換ではなく、ブロック平均法³⁾を採用した。ブロック平均法では、まず、波形全体をいくつかのブロックに等分割し、そのブロック1つ1つに対してフーリエ変換を行い、ブロックごとに周波数スペクトルを算出した。続いて、求めた全ブロックの周波数スペクトルを対象に、周波数ごとにスペクトル強度(周波数成分)を平均することで、最終的な周波数スペクトルを得た。以上より、ブロック平均法では、一般的なフーリエ変換よりも精度の高い周波数スペクトルを得ることができる。

上記の式(1)および式(2)から、センサAおよびBの2点間の複素コヒーレンス $coh(f, r)$ は、次式となる。

$$\begin{aligned} coh(f, r) &= \frac{X_A(f) \cdot X_B^*(f)}{U_A(f) \cdot U_B(f)} \\ &= \exp\{i(\phi_B - \phi_A)\} \\ &= \exp\left\{i \frac{2\pi fr}{c(f, \psi)}\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $*$: 共役複素数、 ψ : 表面波が伝搬してくる方向と2点間とでなす方位角、 c : 見かけの位相速度(ψ によって変化する)である。実際の計測では、表面波が伝搬してくる方向 ψ が不明であるため、次式のように複素コヒーレンス(実部のみ)に対し、方位平均したものを空間自己相関係数 ρ と定義する。

$$\begin{aligned} \rho(f, r) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left\{i \frac{2\pi fr}{c(f, \psi)}\right\} d\psi \\ &= J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 J_0 : 第一種0次ベッセル関数である。

以上が、空間自己相関係数を算出するための定義式となる。実際の計測においては、円の中心のセンサAと円周上のセンサBに加えて、センサAとC、センサAとDのペアから、それぞれ複素コヒーレンスを算出する。

それぞれのペアで算出した複素コヒーレンスの平均をとることで、式(4)の積分の近似とみなして空間自己相関係数を推定している。この複素コヒーレンス ψ に関する平均値は、理論的には実数になるが、種々の測定誤差などにより複素数になる場合がある。そのため、計算上は実部のみをとっている。なお、空間自己相関係数から表面波位相速度を算出するには、第一種0次ベッセル関数でフィッティングさせることで、周波数に依存した表面波位相速度 $c(f)$ が求められる。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体の概要を写真-1に示す。寸法は高さ300 mm×長さ900 mm×幅780 mmで、コンクリート表面からの劣化を模擬した供試体である。

表面からの劣化を模擬するために、フレッシュコンクリートにアルミ粉末を混ぜ込み、水素ガスを発生させながら硬化させることで、多孔質な発泡コンクリートを打重ね、表層に劣化層を有する供試体を作製した。図-3に、供試体ごとに設定した表面からの劣化深さをそれぞれ示す。本研究では、供試体表面からの劣化深さを0、150および300 mmとした供試体A、BおよびCの3体を作製した。

表-1にコンクリートの配(調)合を示す。コンクリートは、生コン工場で製造した呼び強度:40を使用した。コンクリートの使用材料は、セメント:普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/cm³)、水:上澄水、細骨材:栃木県佐野市仙波町砕砂(表乾密度:2.68 g/cm³, 粗粒率:2.80(表-1中のS1))および千葉県君津市久留里大谷砂(表乾密度:2.61 g/cm³, 粗粒率:1.85(表-1中のS2))、粗骨材:栃木県佐野市閑馬町碎石(表乾密度:2.64 g/cm³, 実積率:61.0%(表-1中のG1))および栃木県佐野市会沢町碎石(表乾密度:2.72 g/cm³, 実積率:61.0%(表-1中のG2))、混和剤:AE減水剤遅延型I種である。なお、フレッシュコンクリートの性状は、スランプ18.0 cm, 空気量4.5%である。強度試験

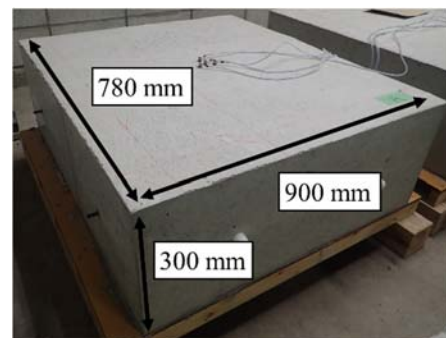


写真-1 供試体の概要

用の円柱供試体は、コンクリートで作製したもの、発泡コンクリートで作製したものの2種類あり、それぞれ材齢28日にJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき圧縮強度試験を実施した結果、コンクリートの圧縮強度は52.3 N/mm²、発泡コンクリートの圧縮強度は11.0 N/mm²であった。

3.2 計測方法

空間自己相関法による計測状況を写真-2に示す。加速度センサは円の中心に1個(ch.1)、中心から半径が20 mmとなる同円周上に3個(ch.2, ch.3およびch.4)等間隔に設置した。一方、振動は、同円周上に設置した加速度センサの外側(円の外側)のコンクリート表面に対して、写真-3に示す鋼球あるいは鉄製チェーンを、連続して、打撃あるいは引きずることにより行った。空間自己相関法とは、2.で説明したとおり、地盤の常時微動を活用する方法である。この方法をコンクリート分野へ適用する場合は、如何にして常時微動、すなわち固有振動数(固有周波数)が生じず、幅広い周波数において成分の分布が見られるような振動を発生させるかが課題となる。そこで、本研究では、直径8.0 mmの鋼球を断続的に打撃、あるいは線径5.5 mmの鉄製チェーンを連続して引きずることにより、常時微動の再現を試みた。使用した加速度センサの周波数応答(±3 dB)は0.2~20000 Hzであり、センサで受信した信号はサンプリング時間間隔9.77 μs、データ数1024000個(計測時間長さ10 s)でデジタル化した後、波形収集装置に電圧波形として記録した。

4. 実験結果および考察

4.1 時刻歴波形

供試体Aを対象に、鋼球および鉄製チェーンで振動を与えた場合に、ch.1の加速度センサで受信した時刻歴波形の例を図-4に示す。鋼球を用いた計測では断続的に打撃したため、打撃した瞬間は振幅が生じているものの、打撃していない時間は振幅が0 m/s²になっていることがわかる。これに対して、鉄製チェーンを用いた場合の時刻歴波形では、チェーンをコンクリート表面に対して引きずり続けたため、10 s間にわたって継続して振動が発生していることがわかる。これらの時刻歴波形(図-4参照)に対して、ブロック平均法で算出した振幅スペクトルを図-5に示す。ここでは、まず、時刻歴波形を31999個のブロックに分割(1ブロックあたり0.02 s)し、ブロックごとにフーリエ変換を行った。続いて、周波数ごとにスペクトル強度(周波数成分)を平均(ブロック数31999個で平均)することで、振幅に関するスペクトル(振幅スペクトル)を求めた。図-5より、いずれの場合も、固有振動数(固有周波数)が出現していること

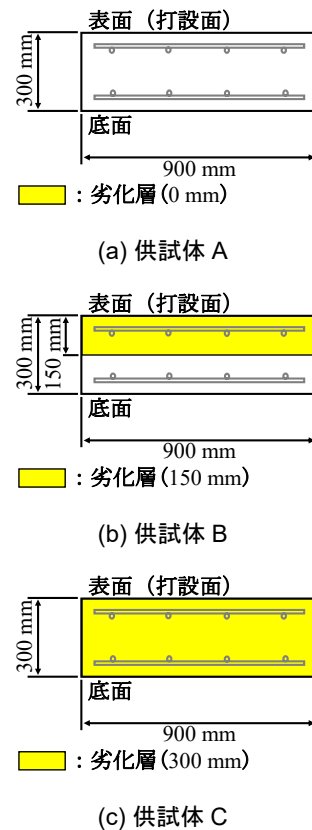


図-3 コンクリート表面からの劣化深さ

表-1 コンクリートの配(調)合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	SI	S2	G1	G2	A
40.5	41.6	184	455	490	204	676	299	5.01

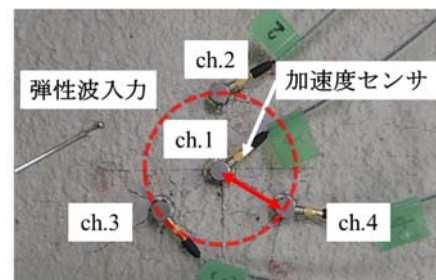
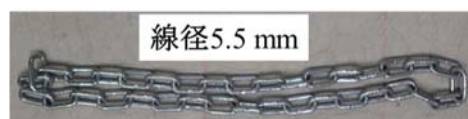


写真-2 計測状況



(a) 鋼球



(b) 鉄製チェーン

写真-3 弾性波の入力方法

がわかる。しかしながら、若干ではあるが、鋼球の方が、より幅広い周波数範囲に成分が分布していることがわかる。そこで、次節に示す表面波位相速度は、鋼球の結果のみを示すことにした。

4.2 表面波位相速度

図-6に、供試体 A を対象に鋼球で振動を与えた場合の空間自己相関係数 (2.2 参照) を赤の実線で示す。図より、0 kHz のときにおよそ 1.0 となり、周波数が高くなるにつれて空間自己相関係数が小さくなる傾向を示した。ここで、一般的な表面波位相速度である 2000 m/s を、第一種 0 次ベッセル関数 (式(4)参照) に代入することで、空間自己相関係数を求めた。その結果を、図-6 中に黒の実線で示す。図中の赤の実線 (鋼球) と黒の実線 (表面波位相速度 2000 m/s) とを比較すると、周波数 0~20 kHz の範囲では、両者の結果は概ね一致していることがわかる。しかしながら、20 kHz 以上では、両者の結果が著しく異なっている。この要因については、以降で詳細に説明する。

図-7 に、表面波位相速度と周波数との関係を示す。この図は、図-6 に示す空間自己相関係数 (供試体 A, 鋼球) から、周波数ごとに表面波位相速度を算出した結果である。また、図-8 に、表面波位相速度と波長との関係を示す。この図では、図-7 に示した表面波位相速度を周波数で除すことにより波長を求め、波長ごとの表面波位相速度の変化がわかるようにした。図-7 および図-8 より、周波数や波長により表面波位相速度が変動していることが確認できる。これは、図-1 に示したとおり、表面波位相速度の分散性があらわれているためである。したがって、地盤分野で見られる表面波位相速度の分散性がコンクリートでも確認できたことを意味しており、空間自己相関法はコンクリート分野にも十分適用できると考えられる。

続いて、図-7 の周波数 20 kHz 以上の表面波位相速度および図-8 の波長 100 mm 以下の表面波位相速度に着目すると、急激な減少あるいは増加が生じている。これは、使用した加速度センサの周波数応答が影響していると思われる。加速度センサの周波数応答 (± 3 dB) の上限が 20 kHz であり、この周波数に相当する波長は、表面波位相速度を 2000 m/s とすれば、およそ 100 mm となる。したがって、これよりも高い周波数 (短い波長) では、空間自己相関係数から算出した図-7 および図-8 に示す表面波位相速度の信頼性は、極めて低いと考えられる。また、これに加えて、コンクリート表面から浅い範囲では、表面波は、図-1 に示すとおり、いずれの周波数 (波長) も伝搬する。したがって、表層を伝搬する表面波位相速度は、あらゆる周波数 (波長) の位相速度を重ね合わせた結果となって算出される。そのため、得

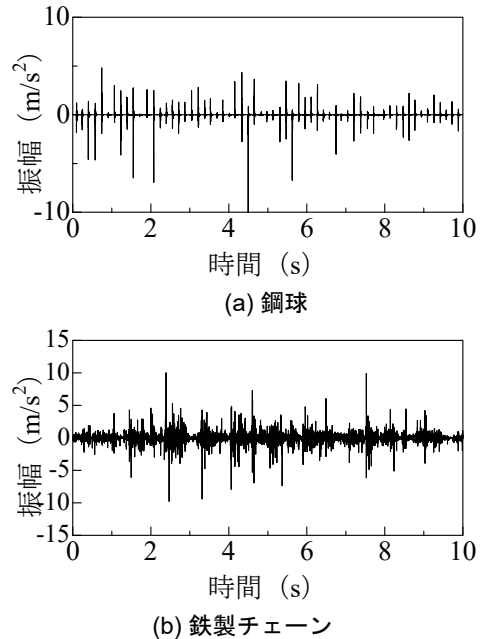


図-4 時刻歴波形の例

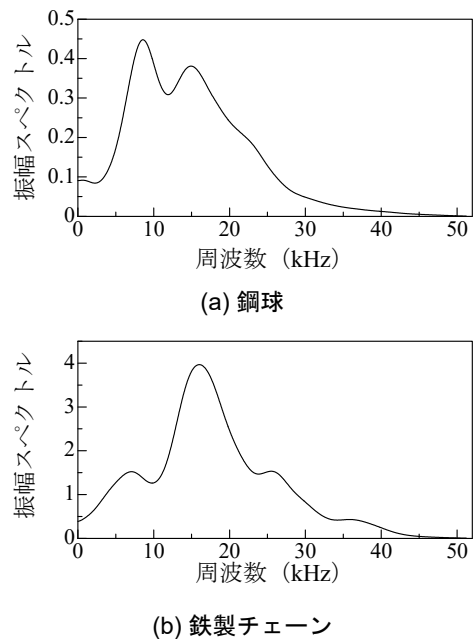


図-5 振幅スペクトルの例

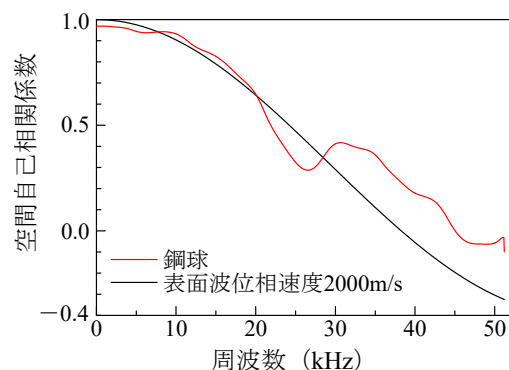


図-6 空間自己相関係数 (鋼球)

られた結果も信頼性が低くなると考えられるが、その深さ方向の範囲については不明なため、今後詳細に検討する予定である。なお、図-6 に示した鋼球の場合の空間自己相関係数（赤の実線）が表面波位相速度 2000 m/s のそれ（黒の実線）と比較して、20 kHz 以降で傾向が顕著に異なっているのも、これらが関係していると思われる。

最後に、図-7 の周波数 10 kHz 以下、波長に換算すると 200 mm 以上（図-8 参照）の表面波位相速度に着目する。この領域での表面波位相速度は、2000 m/s より明らかに遅くなっていることが確認できる。空間自己相関法における波長は、2.1 で説明したように、加速度センサ設置間距離（円の半径）の 2~10 倍が対象となる。これを参考にすれば、実験では円の半径を 20 mm に設定したため、40 mm~200 mm の波長が対象となる。波長 200 mm の表面波に相当する周波数はおよそ 10 kHz であるため、空間自己相関法における評価対象外であり、表面波位相速度が遅くなったと考えられる。さらに、供試体の高さ 300 mm が、波長 200 mm と近い値であるため、供試体底面において反射した表面波の影響により、位相速度が小さくなった可能性も考えられる。これより、対象とする波長は 200 mm、すなわちコンクリート表面から 200 mm までの深さを評価対象とすることにした。

以上、図-6~図-8 までの結果を基に考察すると、評価対象とする深さはコンクリート表面から 100 mm 以上 200 mm 以下（図-8 中の青の斜線部分）であり、この範囲で表面波位相速度を評価するのが適切だと考えられる。

4.3 パーチャルコア

ここでは、コンクリート表面からの深さに対応した表面波位相速度の分布を把握することを試みた。物理探査の分野では、分散曲線（本研究では図-8 に示す表面波位相速度と波長との関係を指す）のインバージョンにより地下構造（表面波位相速度分布）を推定することが多い。本研究では、より簡易的な方法で深さ方向の表面波位相速度分布を把握する方法について検討した。具体的な算出手順を、供試体 A で鋼球の場合（図-8 参照）を例に、以下で説明する。すなわち、表面から深さ 100 mm においては、図-8 に示す波長 75 mm~125 mm の区間で得られた表面波位相速度を平均し 2000 m/s を得た。同様に、深さ 150 mm では波長 125~175 mm、深さ 200 mm では波長 175 mm~225 mm の区間で平均することで、表面波位相速度（両区間ともに 2200 m/s）を算出した。なお、4.2 では表面波位相速度の評価対象深さは 100~200 mm としており、ここで述べた表面波位相速度を算出する波長の範囲 75~225 mm とは若干異なっている。これは、図-1 に示す表面波の分散性を考慮すると、例えば深さ 100 mm の表面波位相速度をピンポイントで求

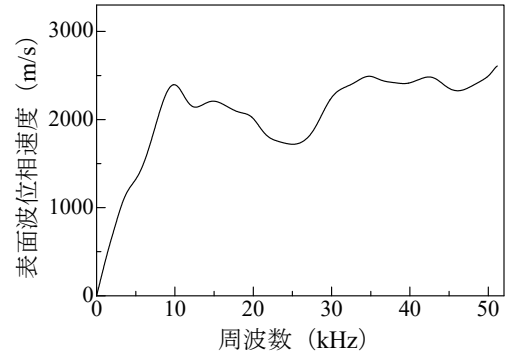


図-7 空間自己相関係数により求めた周波数ごとの表面波位相速度（鋼球）

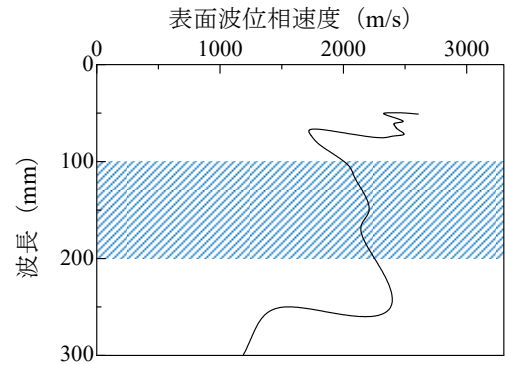
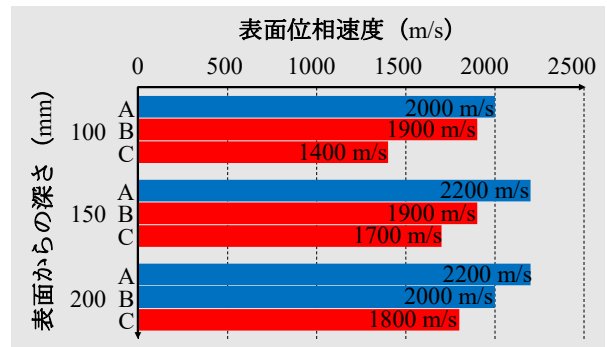
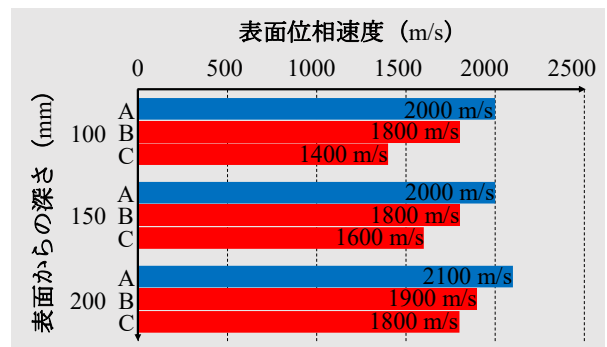


図-8 空間自己相関係数により求めた波長ごとの表面波位相速度（鋼球）

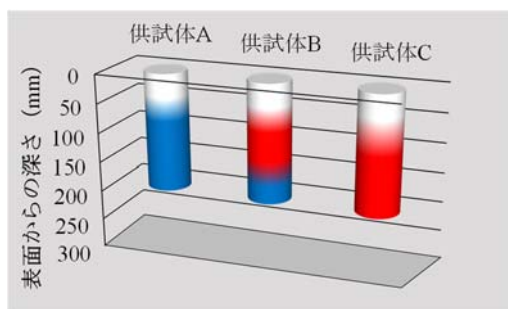


(a) 鋼球

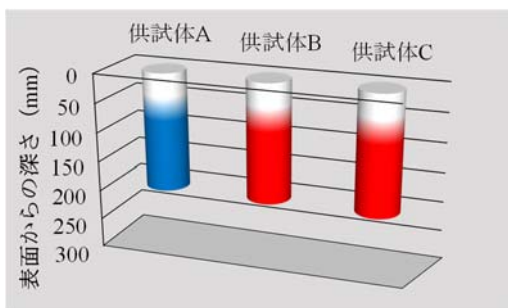


(b) 鉄製チェーン

図-9 コンクリート表面から深さごとの表面波位相速度



(a) 鋼球



(b) 鉄製チェーン

図-10 バーチャルコア

めることができないため、便宜上、75~125 mm と深さ方向に±25 mm の幅をもたせることにした。図-9 に、鋼球および鉄製チェーンでの結果を示す。図では、一般的な表面波位相速度である 2000 m/s を第一種 0 次ベッセル関数に代入して求めた空間自己相関係数が、劣化層の無い供試体 A のそれと相関が高かった（図-6 参照）ことを踏まえて、2000 m/s 以上を青色で、これ未満を赤色の棒グラフで示した。

続いて、図-9 の結果に基づき、深さ方向の表面波位相速度の分布を作成する。写真-2 に示したように、半径 20 mm の円状にセンサを設置して、コンクリート表面から 100 以上 200 mm 以下を評価対象とすることから、表面波位相速度を直径 40 mm×高さ 200 mm（表面からの深さ 100~200 mm）の円柱に投影して、これを、本研究では「バーチャルコア」と呼ぶことにした。バーチャルコアを図-10 に示す。図-10 (a) に示す鋼球のバーチャルコアでは、いずれの供試体においても、図-3 に示す劣化状況に対応して、表面波位相速度の分布が変化していることがわかる。これに対して、図-10 (b) に示す鉄製チェーンの場合は、表面波位相速度は、供試体 A はいずれの深さにおいても 2000 m/s 以上、供試体 B および供試体 C ではいずれの深さも 2000 m/s 未満になっており、図-3 の劣化状況を適切に表現できているとは言い難い。鉄製のチェーンでは、図-5 に示したとおり幅広い周波数帯域の振動を与えることができなかったためだと考え

られる。

以上のことから、本研究の範囲内では、鉄製のチェーンよりも鋼球により振動を与えて求めたバーチャルコアの方が、より適確に、劣化の実態を表現できることがわかった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 鋼球および鉄製チェーンにより振動を与え、地盤構造の推定に用いられている空間自己相関法により表面波位相速度を推定し、これと波長との関係からバーチャルコア（深さ方向の表面波位相速度の分布）を求めた。その結果、鉄製のチェーンよりも鋼球により振動を与えて求めたバーチャルコアの方が、より適確に、劣化の実態を表現できる可能性があることがわかった。
- (2) 地盤構造の推定に用いられている空間自己相関法は、コンクリート分野でも適用でき、しかも劣化深さの評価手法として有効である可能性が示唆された。

今後は、以下の 3 点について検討し、空間自己相関法による劣化深さ評価手法の高度化を目指す。

- (1) 周波数応答 (±3 dB) の上限値が高い加速度センサを使用し、かつそれらの設置半径を短くした計測を行うことで、コンクリート表面から鉄筋のかぶり (100 mm) 程度までを評価する。
- (2) 常時微動を模擬可能な打撃装置を開発する。
- (3) 本研究で検討したコンクリート表面から深さ方向の表面波位相速度の分布を算出する方法は課題があるため、例えば、遺伝的アルゴリズムを用いるなどして改善を試みる。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 (C) 22K04272）の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 紺野克昭：地下構造推定に用いる 2 点間および 3 点間空間自己相関法に関する理論的検討，土木学会論文集 No.654/I-52, pp.367-375, 2000.7
- 2) 岡谷智一，鈴木晴彦，中川博人：微動計 McSEIS-MT NEO の開発と微動探査手法概説，応用地質技術年報 No.31, pp.75-84, 2012
- 3) 松岡達郎，梅沢夏実，巻島秀男：地下構造推定のための空間自己相関法の適用性に関する検討，物理探査，第 49 巻，第 1 号，pp.26-41, 1996