

論文 衝撃弾性波法によるコンクリート版厚推定手法へのウェーブレット解析および自己相関係数の適用

前 裕史^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・内田 慎哉^{*3}

要旨：衝撃弾性波法による版厚推定手法は、入力する弾性波の上限周波数がコンクリートの版厚に相当する版厚共振周波数よりも大きい場合においても、FFTにより算出した周波数スペクトル上で版厚共振周波数が特定できない問題がある。そこで本研究では、この問題を解決するため、受信波形に対してウェーブレット変換を行い、周波数帯域ごとに波を分解し、分解した波形に対して自己相関係数を算出した。その後、相関係数が大きくなる時刻から版厚共振周波数を特定する方法を提案した。その結果、上限周波数と縦波共振周波数の関係を満足する条件下であれば、コンクリートの版厚を推定できることが明らかとなった。

キーワード：非破壊試験, 衝撃弾性波法, コンクリート版厚, FFT, ウェーブレット解析, 自己相関係数

1. はじめに

コンクリート部材の版厚を推定する手法の一つに、衝撃弾性波法がある。この手法は、対象とするコンクリート部材表面に鋼球などを用いて衝撃を与えることにより弾性波をコンクリート中へ入力し、部材表面と底面との間で縦波の繰り返しの反射により生じるピークを周波数スペクトル上において特定し、そのピークの周波数の値から版厚を推定するものである。そのため、このピークを如何にして出現させ、さらには周波数スペクトル上においてどのようにして特定するかが問題となる。この問題に対して、Sansalone ら¹⁾は、縦波の多重反射によるピークを励起させるには、入力する弾性波の上限周波数が、コンクリートの版厚によって生じる理論上の共振周波数（以降、版厚共振周波数と呼ぶ）以上となるように、鋼球の直径を選定する必要があると述べている。

このような背景から、著者らも、版厚共振周波数からコンクリートの版厚を推定する手法についての検討を行なってきた²⁾。しかしながら、Sansalone らが定義している上記の「上限周波数と版厚共振周波数の関係」を満足する条件下においても、周波数全域にわたって成分が分布し、しかも複数のピークが出現するため、版厚共振周波数を周波数スペクトル上で特定することが困難なケースもあることがわかった²⁾。

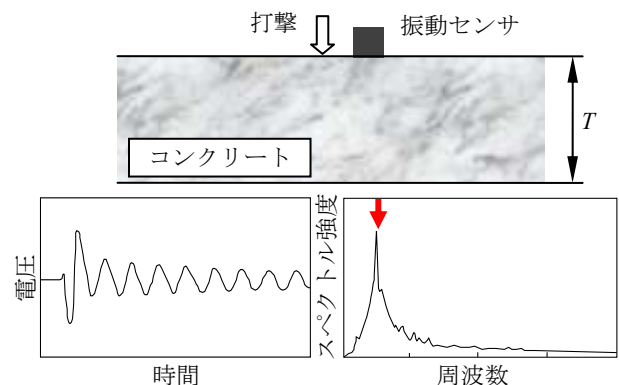
そこで本研究では、この問題を解決する一つの試みとして、離散ウェーブレット変換と自己相関係数の併用によるコンクリート版厚の推定手法についての検討を行なうことを目的とした。この手法の具体的な手順としては、まず、センサで受信した弾性波に対して離散ウェーブレット変換を行い、波を周波数帯域ごとに分解した。その後、分解したそれぞれの波から版厚共振周波数を含む波形にのみ着目し、その波形の自己相関係数を算出し

た。さらに、この相関係数が大きくなる時の時刻を版厚共振現象による周期とし、この値からコンクリートの版厚の推定を行なった。実験では、本手法の適用範囲を明確にするため、弾性波の受信方法に3つの異なるバリエーション（加速度、速度および変位センサ）を設けることとした。

2. 衝撃弾性波法による版厚推定の原理と課題の整理

2.1 版厚推定の原理

衝撃弾性波法による版厚推定の原理を示した概念図を図-1に示す。鋼球を用いてコンクリート表面を打撃することによりコンクリートへ弾性波を入力し、コンクリート表面と底面との間で多重反射する波を、打撃側のコンクリート表面に設置したセンサで受信すると、図-1 a) に示す周期的な電圧波形を測定することができる。得られた波形を周波数分析することにより、図-1 b) に示す周波数スペクトルを算出することができる。この周波数スペクトルにおいて波の多重反射によるピーク（図



a) 電圧波形 b) 周波数スペクトル

図-1 衝撃弾性波法による版厚推定の評価原理

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻特任助教 博士(工学) (正会員)

中の矢印)を特定し、その周波数から版厚を推定することができる。なお、弾性波の多重反射による理論上のピーク(版厚共振周波数)は、以下の式により算出することができる。

$$f = C_p / 2T \quad (1)$$

ここで、 f : 版厚共振周波数 (Hz), C_p : コンクリート中を伝搬した縦波の弾性波速度 (m/s), T : 弾性波が伝搬する方向のコンクリートの厚さ (m) である。

2.2 既往の研究および課題の整理

(1) 入力する弾性波の上限周波数

鋼球の打撃により生じる弾性波の周波数特性は、使用する鋼球の直径に影響を受けることが知られている。鋼球の打撃によって生じる衝撃力と、コンクリートと鋼球との接触時間の関係を図-2に示す。横軸の接触時間は、鋼球直径の大きさによって、その値が変動する。この接触時間と鋼球直径との関係は、Herzの接触理論に基づき、以下の式で定義される。

$$T_c = 0.0043D \quad (2)$$

ここで、 T_c : 接触時間 (s), D : 鋼球直径 (m) である。

続いて、衝撃力の時間関数(図-2 参照)を周波数分析することにより算出した周波数スペクトルを図-3に示す。この図には、Sansaloneら¹⁾が定義した入力する弾性波の上限周波数と鋼球直径との関係を併せて示している。両者の関係式を以下に示す。

$$f_{max} = 291/D \quad (3)$$

ここで、 f_{max} : 入力される弾性波の上限周波数 (Hz) である。図-3および式(3)から明らかなとおり、鋼球直径が大きくなると、入力される弾性波の上限周波数は小さくなる。したがって、版厚共振周波数を周波数スペクトル上で特定するにあたっては、版厚共振周波数を十分に上回ることが可能な弾性波を入力する必要がある¹⁾。

(2) 弾性波の受信方法

振動センサは、版厚共振周波数を含む範囲内において感度特性が平坦なものを使う必要がある³⁾。Sansaloneらは、コンクリート表面での振動を変位の電圧波形として捉えることが可能で、かつフラットな感度を有するコンカル型変位センサを開発し、このセンサにより版厚共振周波数の測定を行なっている¹⁾。一方、著者らは、同じく感度特性が平坦である加速度センサを用いて、コンクリートの版厚推定²⁾を行なっている。これに対して、境らは、周波数スペクトル上で版厚共振を特定する場合、変位や加速度センサよりも、速度センサの方が適していると指摘している。そのため、加速度センサで検知した電圧波形を1回積分することで速度の電圧波形に変換し、これを周波数分析することにより版厚共振周波数の特定を行なっている⁴⁾。

(3) 周波数分析手法

周波数スペクトルにおいて、版厚共振周波数を出現させるための周波数分析手法としては、FFT²⁾、鋼球の接触時間帯を測定波形の初期部分から除去した上でFFTを行う方法³⁾、最大エントロピー法(MEM)法⁵⁾および受信波形の自己相関関数をFFTする方法⁶⁾などがある。既往の研究成果によれば、上記の周波数分析手法や弾性波の受信方法の違いに関わらず、版厚共振周波数を十分に上回ることが可能な弾性波を入力しても、周波数スペクトル上においてこの共振現象を励起させることが困難な場合があると報告されている^{2), 6)}。

3. 実験概要

3.1 供試体

写真-1にコンクリート版供試体の概要を示す。供試体側面における弾性波の反射の影響を極力小さくするため、長さや幅それぞれの寸法を1800mmとした。供試体の版厚は、ASTM-C1383-04⁷⁾に基づき決定した。すなわち、この規格⁷⁾によれば、版厚共振周波数を明瞭に出現させるためには、長さや幅に対して1/6以下のコンクリート版厚にする必要がある。この条件を満足させるため、供試体の版厚を280mmとした。

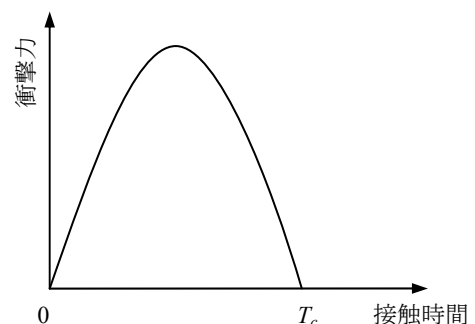


図-2 衝撃力と接触時間の関係

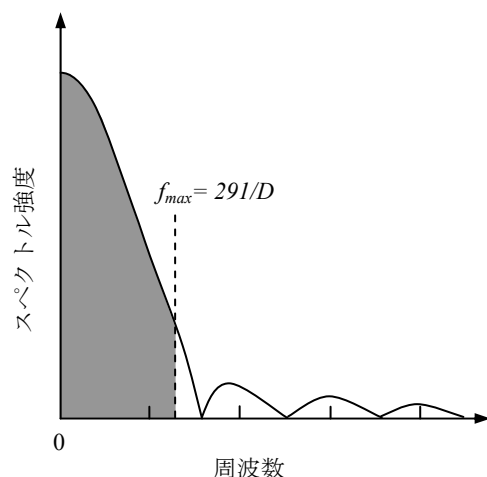


図-3 入力される弾性波の周波数スペクトル

3.2 衝撃弾性波法の計測

入力する弾性波の上限周波数を変化させることを目的に、直径の異なる3種類の鋼球を用いた。写真-2に、使用した3種類の鋼球直径を示す。また、表-1に、鋼球直径と Sansalone らによって定義された上限周波数¹⁾との関係を示す。

一方、弾性波の受信は、計測物理量の違いが周波数スペクトル上における版厚共振周波数の特定に与える影響を把握するため、圧電型加速度センサ、非接触型レーザードップラー振動センサ（以降、速度センサと呼ぶ）およびコニカル型変位センサの3種類を使用した。図-4に、使用した3種類のセンサを示す。加速度センサは、0.003~30kHz の間でフラットな応答感度を有するものである。これに対して、速度センサおよび変位センサのそれぞれの応答感度は、0.0005~30kHz および 0~1MHz の間でフラットな特性を有したものである。

写真-3 に計測状況を示す。1 回の打撃により生じた弾性波は、加速度センサ、速度センサおよび変位センサで同時に受信した。また、いずれのセンサを使用した場合においても、弾性波の入力位置から受信位置までの距離は約 100mm とした。

コンクリートを伝搬する縦波の速度は超音波法により算出した。すなわち、二つの探触子を対面に配置（センサ間距離：280mm）した上で、縦波の伝搬時間の測定を行なった。異なる 10 箇所ので伝搬時間の測定を行ない、その平均値から縦波の速度を求めた結果、4090m/s となった。

4. FFT により算出した周波数スペクトルでの版厚共振周波数の特定とその問題点

各種センサで受信した時刻歴波形を FFT することにより算出した周波数スペクトルを図-5 に示す。図中では、使用した鋼球の直径： D およびその鋼球における弾性波の上限周波数： f_{max} を併せて示している。また、周波数スペクトル上の矢印は、版厚共振周波数である。なお、この共振周波数は、縦波の伝搬速度：4090m/s および版厚：280mm を式(1)に代入し、7.3kHz となった。

弾性波の受信方法に関わらず、入力する弾性波の上限周波数が小さくなるにしたがって、版厚共振周波数の近傍に単独のピークが出現する傾向を示した。特に、上限周波数が 15.2kHz（鋼球直径：19.1mm）の場合では、い

表-1 鋼球直径と上限周波数の関係

鋼球直径： D (mm)	6.4	12.8	19.1
上限周波数： f_{max} (kHz)	45.4	22.7	15.2



[単位：mm]

写真-1 供試体概要



写真-2 弾性波の入力に用いた鋼球



写真-3 衝撃弾性波法の計測状況

受信方法	形状	周波数範囲
加速度		0.003~30kHz
速度		0.0005~30kHz
変位		0~1MHz

図-4 計測に使用したセンサ

ずれのセンサで受信した場合においても、目視によりピークを容易に特定することができる。これに対して、弾性波の上限周波数が大きくなると、周波数全域にわたって成分が分布し、しかも複数のピークが出現しているため、版厚共振周波数を特定することは極めて困難であった。したがって、版厚共振周波数を十分に上回る弾性波を入力した場合においても、コンクリートの版厚を推定できない場合があることがわかった。この結果は、著者らの既往の研究成果とも一致した²⁾。そこで、FFTにより算出した周波数スペクトルからコンクリート版厚を推定することが困難な条件下において、版厚を推定するための工夫として、離散ウェーブレット変換および自己相関係数を併用することを試みた。次章にその詳細を示す。

5. ウェーブレット変換および自己相関係数の併用によるFFTに基づく版厚推定手法の改善

センサで受信した電圧波形（元波形）から版厚共振周波数に相当する周期を持つ波形を抽出することを目的に、元波形に対して離散ウェーブレット変換を行なった。この計算により、元波形を設定した周波数範囲ごとに分解することが可能となる。使用したマザー・ウェーブレット関数は、Daubechies ウェーブレット⁸⁾である。このウェーブレット変換により波を高周波成分から逐次分解していく手順を図-6に示す。元波形のウェーブレット変換は、一組のフィルターを通すことから計算が始まる。すなわち、まず、元波形はハイパスフィルターを通過した詳細波形(D1)と、ローパスフィルターを通過した近似波形(A1)に分解される(この作業をレベル1と呼ぶ)。

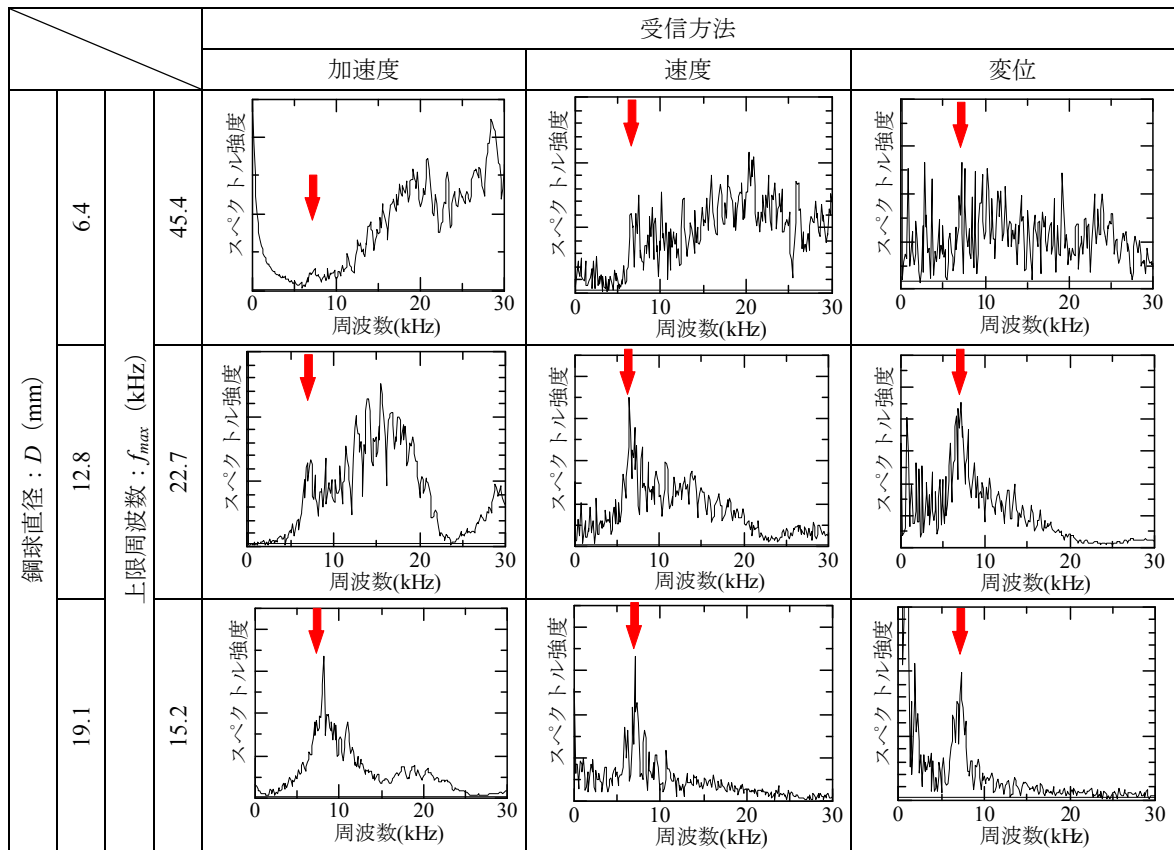


図-5 FFTにより算出した周波数スペクトル

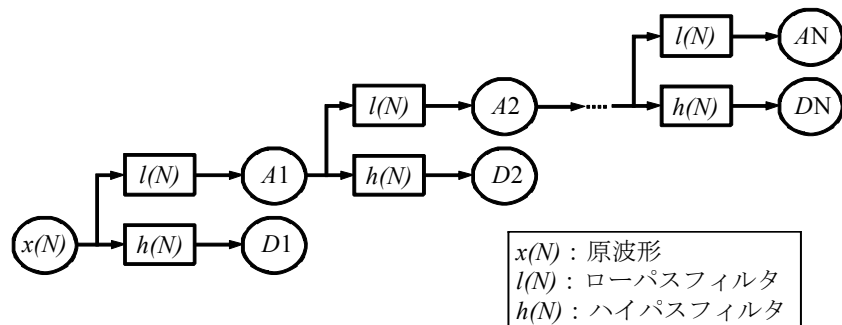


図-6 ブロックダイアグラム

続いて、ローパスフィルタを通過した $A1$ に対して、さらにハイパスおよびローパスフィルタをかけることにより、 $D2$ と $A2$ に分解する（レベル 2）。以上のような計算をレベル N となるまで行うことにより、元波形を高周波数成分の波から逐次分解していくことができる。したがって、元波形とレベル N までの近似および詳細との間には、以下の式が成立する。

$$x(N) = a_n + d_n + d_{n-1} + \dots + d_2 + d_1 \quad (4)$$

図-7 に、鋼球直径 6.4mm、加速度センサで受信した元波形およびその波形に対してレベル 8 となるまで Daubechies ウェーブレットした結果（波形）をそれぞれ示す。鋼球直径 6.4mm で入力される弾性波の上限周波数が 45.4kHz であることから、ここではレベル 5～8 で分解された波形のみを示している。各レベルにおける周波数範囲は図に示すとおりである。また、図上で各波形の周期を判読しやすくするため、時間軸 0～2ms の範囲を拡大して示している。図より、元波形を離散ウェーブレット変換することにより、各レベルで設定した周波数範囲となるような波形にそれぞれ分解されていることが確認できる。

コンクリートの版厚が 280mm、かつコンクリート中を伝搬する縦波の弾性波速度が 4090m/s から推定した版厚共振周波数は 7.3kHz である。したがって、離散ウェーブレット解析により分解したレベル 7 の波形は、版厚共振周波数を含んだものである。そこで、レベル 7 の波形において、版厚共振による周期的な信号を抽出するため、この波形に対して自己相関係数の算出を行なった。なお、自己相関係数は以下の式により算出した。

$$\rho_j = \frac{\sum_{m=0}^{L-1} x_m x_{m+j}}{\sum_{m=0}^{L-1} x_m^2} \quad (5)$$

ここで、 ρ_j ：自己相関係数、 x_m ：時刻歴波形における振幅値、 L ：振幅値の総数、 j ：変数（0～ $N/2$ の範囲における自然数）である。

図-7 に示すレベル 7 波形から算出したコレログラムを図-8 に示す。図より、一定の間隔で自己相関係数が大きくなっていることが確認できる。この相関係数が大きくなる時刻（図-8 中の点線）を版厚共振現象による

周期であると仮定し、この値（図より 132μs）の逆数がコンクリートの版厚によるピークであるとした。表-2

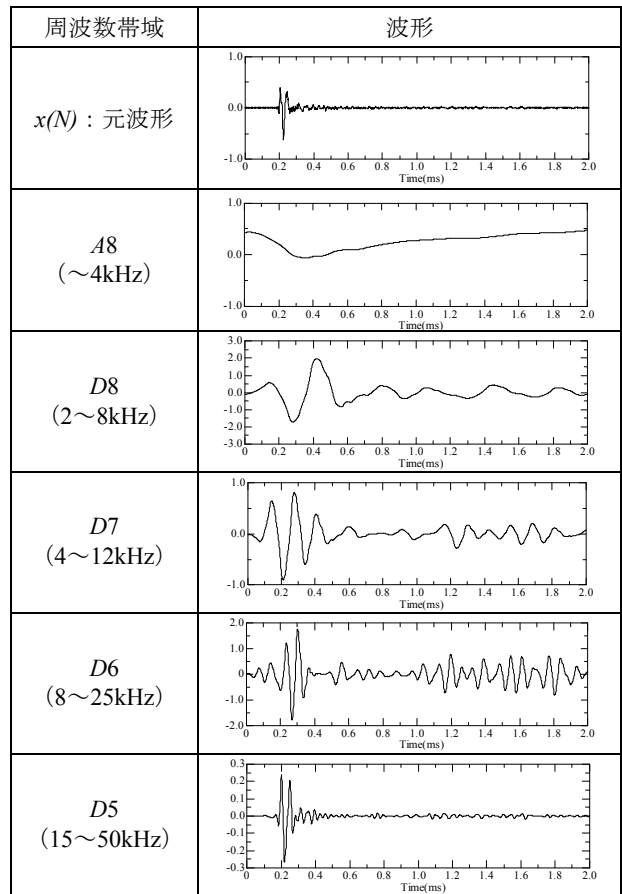


図-7 元波形および離散ウェーブレット変換により周波数帯域ごとに分解された波形

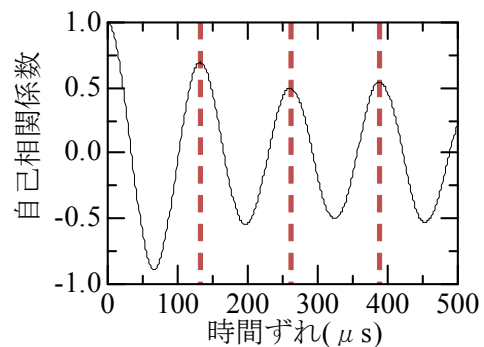


図-8 コレログラム（鋼球直径：6.4mm、受振方法：加速度）

表-2 ウェーブレット解析および自己相関係数を併用した版厚推定の結果

受信方法	鋼球直径 D (mm)	自己相関係数における 極大値の最大値	時間 t_{max} (μs)	ピーク周波数 (kHz)	推定版厚 (mm)	版厚共振 周波数 (kHz)	実際の版厚 (mm)
加速度	6.4	0.658	132	7.6	270	7.3	280
	12.8	0.878	134	7.5	274		
速度	6.4	0.713	132	7.6	270		
変位	6.4	0.753	148	6.8	303		

に、算出したピークの周波数およびその値から推定したコンクリートの版厚を併せて示す。表より、算出したピーク周波数は、版厚共振周波数とほぼ一致していることがわかる。したがって、このピークから推定した版厚も、実際の版厚に近い結果となった。なお、表-2では、FFTにより算出した周波数スペクトルからコンクリート版厚を推定することが困難であった、その他3つのケース（鋼球直径 6.4mm の速度、変位および直径 12.8mm の加速度）を対象に版厚の推定を行なった結果を併せて示している。いずれの場合においても、版厚の推定が可能であることが明らかとなった。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 本研究で対象としたコンクリートの版厚 280mm の条件では、入力する弾性波の上限周波数が、コンクリートの版厚に相当する版厚共振周波数よりも大きい場合においても、FFT により算出した周波数スペクトル上において、版厚共振周波数が出現しない場合があった。しかもこの現象は、受信する波の物理量に関わらず、同様の結果となった。
- (2) FFT では版厚共振周波数を特定することが困難な上記(1)のケースにおいて、離散ウェーブレット変換により分解した波形に対して自己相関係数を算出し、さらに相関係数が大きくなる時刻から周波数を求めることにより、波の多重反射によるピークを抽出することができた。しかもこの値は、版厚共振周波数とほぼ一致した。
- (3) したがって、本研究の範囲内においては、上限周波数と縦波共振周波数の関係を満足する条件下であれば、センサ種類に関わらず、ウェーブレット変換および自己相関係数を併用することにより、コンクリートの版厚を推定できることが明らかとなった。

本研究では、コンクリートの版厚が 280mm の場合を対象に、衝撃弾性波法により測定した受信波形に対して、

離散ウェーブレット変換および自己相関係数を適用し、版厚の推定を試みた。今後は、コンクリートの版厚が大きい場合や鋼球直径が大きいケースについての検討も加え、本手法の適用範囲を明確にする予定である。

謝辞

本研究は、国土交通省委託研究事業 新道路技術会議 技術研究開発プロジェクト 「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Sansalone, M. and Streett, W. B. : Impact Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., pp.159-166, 1997
- 2) 鎌田敏郎, 内田慎哉ほか: 弾性波の入力方法がインパクトエコー法によるコンクリート版厚推定に与える影響, 材料, Vol.58, No.8, pp.684-690, 2009.8
- 3) NDIS 2426-2: コンクリート構造物の弾性波による試験方法 第 2 部: 衝撃弾性波法, 日本非破壊検査協会, 2009
- 4) 境 友昭ほか: 衝撃弾性波法によるコンクリート板の厚さ測定方法, コンクリート技術シリーズ 73 第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, pp.173-178, 2007
- 5) 岩野聡史ほか: 非破壊試験によるコンクリート構造物の部材厚さの測定および変状の検出, 非破壊検査, Vol.58, No.4, pp.152-158, 2009.4
- 6) 岩野聡史ほか: 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001
- 7) ASTM-C1383-04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, 2004
- 8) 例えば, 榊原 進: 数理科学 ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電気大学, 2003