

氏名（本籍）	内田 慎哉（埼玉県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第 328 号
学位授与日付	平成 20 年 3 月 25 日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	弾性波法によるコンクリートの物性および欠陥の非破壊評価 (Nondestructive evaluation of material properties and defects in concrete by elastic-wave methods)
学位論文審査委員	(主査) 教授 六郷 恵 哲 (副査) 教授 森本 博 昭 教授 内田 裕 市 教授 鎌田 敏 郎 (大阪大学)

## 論文内容の要旨

土木学会コンクリート委員会の「弾性波法によるコンクリートの非破壊検査研究小委員会」では、さまざまな名称で定義されてきた弾性波による手法を、弾性波の入力および受振の方法の違いに基づいて「AE法」、「超音波法」、「衝撃弾性波法」および「打音法」の4つに分類し、それぞれの手法における代表的な評価指標と評価対象について整理している。実際の点検業務において、弾性波法の適用を考える場面では、あらかじめ評価すべき対象（例えば、ひび割れ深さや内部の欠陥など）が決まっているため、これに基づいてどの手法を用いるかを決定することが可能である。

しかしながら、評価対象に対して適用できる手法が複数存在するため、経験の乏しい技術者にとってはどの手法を活用するかを判断することは難しい。さらに、適切な手法を選択したとしても、評価指標（伝播速度・伝播時間、振幅・エネルギー、周波数特性など）と評価対象との関係を適切に把握および理解していない場合、測定した結果を十分に活用することができない。したがって、実務の場面において弾性波法がより有効に活用されるためには、弾性波法の分類を定義することよりも、評価指標すなわち弾性波の伝播特性（伝播速度・伝播時間、振幅・エネルギー、周波数特性など）と評価対象との関連性を理論的に明示することが望ましいと考えられる。弾性波伝播特性と評価対象との対応関係を詳細に検討し、これらを体系化することができれば、弾性波法の適用における上述の課題が解決され、さらには、弾性波法の信頼性の向上に繋がるものと考えられる。

本研究においては、コンクリートの物性および欠陥評価手法における評価指標としての弾性波伝播特性（伝播速度・伝播時間、振幅・エネルギーおよび周波数特性）それぞれにおける特徴とその役割を明らかにすることを目的とした。この目的を達成するため、評価対象（コンクリートの物性および欠陥）を「コンクリート中での弾性波挙動に影響を与える因子」として捉え、これらを適切に分類した上で、評価対象の分類ごとに評価指標としての弾性波伝播特性（伝播速度・伝播時間、振幅・エネルギーおよび周波数特性）との関係を明らかにし、これらを整理して体系化することを試みた。本研究において、以下の結果が得られた。

(1) 「伝播速度・伝播時間」は、伝播経路や弾性係数の変化に伴って変動する伝播特性で

ある。測定した伝播時間あるいは算出した伝播速度は、いずれもみかけ上の値である。そのため、値の絶対値に物理的な意味はほとんどない。しかしながら、伝播時間や伝播速度の値の計測点ごとの分布、あるいは経時変化を把握することにより、コンクリートの物性や欠陥を評価することが可能である。

- (2) 「振幅・エネルギー」は、コンクリート中の粘性、骨材や空隙などによる散乱減衰、コンクリートと空隙との界面などの反射源の発生や変動に伴って変化する伝播特性である。伝播速度同様に、測定した受振波の振幅・エネルギーの値による絶対評価は困難であり、かつ振幅およびエネルギーの値そのものには物理的な意味はない。そのため、評価指標として振幅・エネルギーを用いる場合は、初期値に対するある時刻やある時点での値の比率とする必要がある。伝播速度・伝播時間と比較すると、コンクリートの物性や欠陥評価における評価指標としての感度が良好なため、コンクリート中に生じた微細な変化を捉えることが可能である。しかしながら、入力する波のエネルギーによる振幅・エネルギーの変動も大きくなり、またセンサとコンクリートとの接触圧の影響により値の変化が著しくなるため、これらの影響を十分理解、あるいは排除した上で活用しなければならない。
- (3) 「周波数特性」は、入力する波の波長（周波数）が小さい（大きい）場合、振幅・エネルギーと同様に、コンクリート中の粘性減衰、コンクリート中の骨材や空隙などによる散乱減衰、反射源の分布状況に起因して変化する伝播特性である。一方、波の波長（周波数）が大きい（小さい）場合では、波が音響インピーダンスの著しく異なる層間において多重反射するため、空隙などの深さを把握することができる伝播特性である。前者の場合は、必然的に入力する波のエネルギーが小さくなるため、使用できるセンサは AE センサなどが好ましい。そのため、周波数特性には、センサの応答感度に相当する周波数が卓越することになる。卓越した周波数の値には、物理的な意味がないため、時間的な周波スペクトルの分布形状の相対比較や、計測点ごとの分布形状の比較により、コンクリートの物性や欠陥の変化を把握することができる。これに対して後者では、波のエネルギーが大きくなるため、応答感度がフラットな変位センサや加速度センサを適用できる。そのため、周波数スペクトル上におけるピーク周波数の値から、欠陥までの深さを把握することが可能である。

## 論文審査結果の要旨

この論文においては、コンクリートの凝結硬化時の物性やコンクリート内部の欠陥（ひび割れ、剥離、空洞等）などの評価対象ごとに、評価指標としての弾性波伝播特性（伝播速度・伝播時間、振幅・エネルギー、周波数特性）との関係を明らかにし、弾性波伝播特性の特徴と役割を明確にしている。車両の走行により劣化した道路橋RC床版の疲労損傷を、インパクトエコー法により検出できることを明らかにしている。コンクリート内部の鉄筋を電磁気的に振動させ表面で弾性波を検出することにより、鋼材腐食により生じた鉄筋とコンクリートとの剥離の程度を定量化する手法を提案している。供用中のコンクリート橋のPC鋼棒周辺のグラウト充填度を、弾性波伝播速度を指標として精度よく評価できることを明らかにしている。この論文は、次に詳しく示すように重要な研究結果を含んでおり、新規性、有用性の点で優れている。したがって、審査の結果、この論文を学位論文に値するものと判定した。

- (1) 伝播速度・伝播時間は、伝播経路や弾性係数の変化に伴って変動する伝播特性であり、測定した伝播時間あるいは算出した伝播速度は、いずれもみかけ上の値である。そのため、値の絶対値に物理的な意味はほとんどないことを指摘している。しかしながら、伝播時間や伝播速度の値の計測点ごとの伝播速度・伝播時間の分布、あるいは経時変

化を把握することにより、コンクリートの物性や欠陥を評価することが可能であることを明らかにしている。

- (2) 振幅・エネルギーは、コンクリート中の粘性、骨材や空隙などによる散乱減衰、コンクリートと空隙との界面などの反射源の発生や変動に伴って変化する伝播特性であり、伝播速度同様に、測定した受振波の振幅・エネルギーの値による絶対評価は困難で、かつ振幅およびエネルギーの値そのものには物理的な意味はないことを指摘している。そのため、評価指標として振幅・エネルギーを用いる場合は、初期値に対するある時刻やある時点での値の比率とする必要があると述べている。振幅・エネルギーは、伝播速度・伝播時間と比較すると、コンクリートの物性や欠陥評価における評価指標としての感度が良好なため、コンクリート中に生じた微細な変化を捉えることが可能であるが、入力する波のエネルギーによる振幅・エネルギーの変動も大きくなり、またセンサとコンクリートとの接触圧の影響により値の変化が著しくなるため、これらの影響を十分理解、あるいは排除した上で活用しなければならないことを明らかにしている。
- (3) 周波数特性は、入力する波の波長（周波数）が小さい（大きい）場合、振幅・エネルギーと同様に、コンクリート中の粘性減衰、コンクリート中の骨材や空隙などによる散乱減衰、反射源の分布状況に起因して変化する伝播特性であるが、一方で、波の波長（周波数）が大きい（小さい）場合では、音響インピーダンスが著しく異なる層間において波が多重反射するため、空隙などの深さを把握することができる伝播特性であるとしている。前者の場合は、必然的に入力する波のエネルギーが小さくなるため、使用できるセンサは AE センサなどが好ましく、そのため、周波数特性には、センサの応答感度に相当する周波数が卓越することになり、卓越した周波数の値には、物理的な意味がないため、時間的な周波スペクトルの分布形状の相対比較や、計測点ごとの分布形状の比較により、コンクリートの物性や欠陥の変化を把握することができることを指摘している。これに対して後者では、波のエネルギーが大きくなるため、応答感度がフラットな変位センサや加速度センサを適用できることを指摘している。そのため、周波数スペクトル上におけるピーク周波数の値から、欠陥までの深さを把握することが可能なことを明らかにしている。

## 最終試験結果の要旨

- (1) 公表論文  
この論文の主要部分は、審査付き論文 11 編と国際会議論文 2 編として既に発表済みである。この論文が学位論文として完成された内容を有することを確認した。
- (2) 修得単位  
指定された単位を修得していることを確認した。
- (3) 公聴会  
公聴会を開催して審査を行った。学位審査委員会で審議の結果、最終試験に合格と判定した。