

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656271

研究課題名(和文)非線形超音波によるコンクリートの非破壊評価への新たな試み

研究課題名(英文)A New Approach for Non-Destructive Evaluation of Concrete by Nonlinear Ultrasonic Testing

研究代表者

鎌田 敏郎 (KAMADA, TOSHIRO)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10224651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」を試作し、非線形超音波によりコンクリート内部の微細な欠陥や品質の違いを非破壊で評価する手法の開発を試みた。本手法の適用対象としては、コンクリート中の接触界面およびフレッシュセメントペーストの凝結硬化過程を取り上げ、いずれに対しても、その有効性が概ね把握できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a non-linear ultrasonic testing system for Concrete was produced as a prototype. Flaw detections and materials evaluation in concrete were tried by using the newly proposed measuring system. As a result, higher harmonics were recognized in experiments for concrete specimens with contact interface. On the other hand, pulse wave generated by this testing system was effective to propagate through fresh cement paste specimens. Possibility of the developed system could be confirmed in this trial.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート 非破壊試験 非線形超音波法 界面 水セメント比 ひずみ 高調波

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリートを対象とした非破壊試験法としての超音波法では、応力ひずみ関係が線形で近似できる伝播媒体(コンクリート)に対して、各種線形パラメータ(超音波伝播速度、欠陥からの反射エコーなど)を測定することにより、コンクリートの弾性係数(場合によってはコンクリート強度)の推定、コンクリート内部の空隙(欠陥)の有無や深さを推定することが可能である。評価原理としては、例えば、欠陥からの反射エコーに基づくコンクリート中の欠陥深さの推定の場合、欠陥サイズが波長よりも大きい場合に欠陥が検出可能である。したがって、幅の極めて小さいひび割れ、ひび割れ面同士が接触した閉じたひび割れ、異種材料接合界面における層状のはく離では、その検出や評価を行うことが極めて難しいのが実情であった。

これに対して、金属材料などを対象とした領域では、伝播媒体に対して大振幅(大電圧)超音波を入射し、応力ひずみ関係が非線形となるひび割れの閉口部分を強制的に開口させて開閉口振動を誘起させ、この振動成分を有する波形を分析する「非線形超音波法」がある。開閉口振動により入射波形にひずみが生じ(音響非線形性)、入射波形の周波数の整数倍の周波数成分を持つ波である「高調波」が発生する。この高調波を評価パラメータとすることで、波長よりも小さい欠陥を検出することが可能となる。近年、例えば機械分野では、琵琶ら(On the Acoustic Nonlinearity of Solid-Solid Contact with Pressure-Dependent Interface Stiffness, Trans. ASME J. Appl. Mech., 71, pp.508-515, 2004)により金属材料の不完全接合面の特性評価のために非線形超音波法を適用した研究が行われている。一方、コンクリートを対象とした場合では、Payanら(Applying Nonlinear Resonant Ultrasound Spectroscopy for Improving Thermal Damage Assessment in Concrete, J. Acoust. Soc. Am. Vol.121, No.4, pp.EL125-EL130, 2007)が、金属材料で既に実績がある既製の非線形超音波計測装置を用いて計測を試みた結果を報告している程度であり、コンクリートへの適用可能性については十分なエビデンスが得られていないのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究では、金属分野で使用されている汎用の非線形超音波装置をコンクリートへ適用できるように改良した上で、コンクリート内部の微細な欠陥や品質の違いを非破壊で評価する手法の開発を試みた。本手法の適用対象としては、コンクリート中の接触界面およびフレッシュセメントペーストの凝結硬化過程とした。

## 3. 研究の方法

### (1)「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」の開発

金属分野で使用されている汎用の非線形超音波装置をコンクリートへ適用できるように改良を試みた。

### (2)コンクリート中の接触界面の非破壊評価手法

開発した「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」を用いて、コンクリート中の接触界面の非破壊評価における非線形超音波法の適用可能性について検討した。具体的には、2体のモルタル供試体(1体の供試体寸法:100mm×100mm×50mm)を突き合わせた(突き合わせ面:100mm×100mm)際に形成される界面の接触状態の違いが、「受信波形」および「高調波成分の出現」に与える影響についての検討を行った。界面の接触状態には2ケースを設定した。すなわち、界面にコンクリートの超音波探傷試験で使用される接触媒質と滑石を主原料とするタルカムパウダーをそれぞれ介在させた。前者の接触媒質を介在させた場合は、接触媒質はジェル状の物質であり、コンクリートの音響インピーダンスと極めて近い物性を有しているため、接触界面の状態を「密着」と想定することができる。一方、パウダーの場合は、微小な粒子の集合で形成されているため、接触界面の状態は「微小空隙」と考えられる。

「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」における超音波探触子は、中心周波数500kHzのものであり、入力周波数300kHzの正弦波を10波生成させた。

### (3)凝結硬化過程の非破壊評価手法

水セメント比が40%、50%、60%のセメントペーストを作製し、セメントに水が反応した後、30分が経過するまでの間、「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」によりモニタリングを行った。超音波探触子および入力周波数は、前述の(2)と同じである。

## 4. 研究成果

### (1)「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」の開発

改良した非線形超音波システムを図1に示す。主な改良点としては、金属の場合よりもコンクリート中における弾性波の減衰が著しいため、大電圧を加えられるように印加電圧を大幅に大きく(1415V<sub>p-p</sub>、金属分野で使用されている一般的な印加電圧と比較して約3倍以上)した。また、コンクリートは骨材、空隙、セメントペーストから構成される複合材料のため、金属と比較して散乱の影響が大きい。そのため、低い周波数帯域の弾性波を取り扱えるように、入力周波数の帯域を20kHz~5MHz、受信周波数の帯域を15kHz~20MHzの間でそれぞれ設定できるものとした。

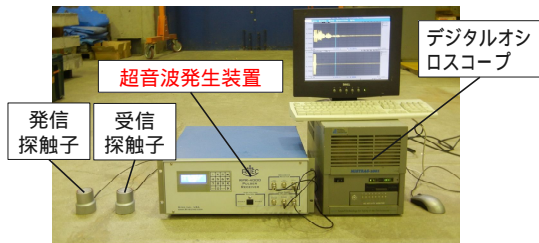


図1 コンクリート対応型の非線形超音波計測システムの概要

## (2)コンクリート中の接触界面の非破壊評価手法

(1)で開発した「コンクリート対応型の非線形超音波計測システム」を用いて得られた波形(密着)の一例を図2に示す。受信波形の一部分に「ひずみ」が生じていることが確認できる。接触媒質を透過する弾性波により、界面の開閉口振動が励起され、受信波形にひずみが生じたものと考察できる。なお、パウダーの場合も受信波形の一部分にひずみが生じていた。接触媒質を透過する弾性波により、界面の開閉口振動が励起され、受信波形にひずみが生じたものと考察できる。なお、パウダー(微小空隙)の場合も受信波形の一部分にひずみが生じていた。

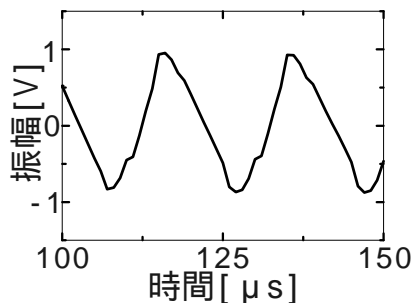


図2 受信波形の一例

図2に示す波形を高速フーリエ変換した際の周波数スペクトルを図3に示す。図より、入射周波数(300kHz)の2倍および3倍の周波数の位置にもピーク(高調波)が出現していることがわかる。したがって、接触界面を弾性波が通過することで波形にひずみが生じ、その結果、受信波の周波数スペクトル上に入力周波数の整数倍の位置にピークが出現することが把握できた。なお、微小空隙の場合も高調波の出現が確認された。

以上より、金属用の汎用的な非線形超音波装置をコンクリート用に新たに改良した装置を用いることで、非線形超音波法のコンクリート分野での適用可能性が示唆された。

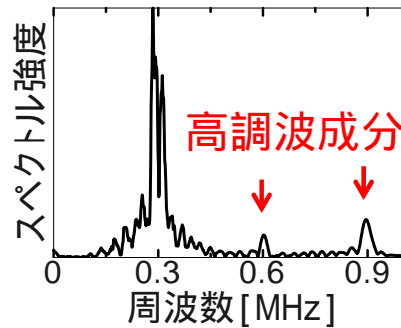


図3 周波数スペクトルの一例

## (3)凝結硬化過程の非破壊評価手法

非線形超音波により、フレッシュセメントペーストの凝結硬化過程をモニタリングすることが可能であり、かつ、受信波の波形エネルギーを評価指標として用いることで、フレッシュな状態のセメントペーストの水セメント比(単位水量)の違いを評価できる可能性が示唆された。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

門田 篤, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 加藤大

基: 非線形超音波法に基づくコンクリ

ート中の接触界面の評価手法に関する基礎

研究, 平成25年度全国大会 土木学会第

68回年次学術講演会講演概要集, 査読無,

第V部門, pp.695-696, 2013.

門田 篤, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 加藤大

基: コンクリート中の接触界面の非破壊

評価への非線形超音波法の適用の試み,

平成25年度土木学会関西支部年次学術

講演会講演概要集, 査読無, V-31, 2013.

〔学会発表〕(計1件)

門田 篤, 内田慎哉, 鎌田敏郎, 加藤大

基: 非線形超音波法によるコンクリ

ート中の接触界面の非破壊評価手法に関する

基礎的研究, コンクリート構造物の補修,

補強, アップグレード論文報告集 技術・

工事報告集, 第13巻, 2013.11.8, 京都

テルサ

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

鎌田 敏郎 ( KAMADA TOSHIRO )

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10224651

(2)研究分担者

内田 慎哉 ( SHINYA UCHIDA )

立命館大学・理工学部・講師

研究者番号：70543461