

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14019

研究課題名(和文) 土木構造物の効率的非破壊検査のための空気超音波法の開発

研究課題名(英文) Development of air-coupled ultrasonic testing for efficient nondestructive inspection of civil structures

研究代表者

廣瀬 壮一 (Hirose, Sohichi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：00156712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、非接触非破壊試験法の一つである空気超音波法の送受信効率の向上を目的として、有限要素解析を援用して空気超音波探触子を最適設計したものである。特に、整合層の厚さのみならず、ダイシングによる形状加工をも組み合わせた探触子の最適設計手法を提案した。数値解析においては、ダイシング間隔に合わせた周期構造による3次元モデルを用い、周期構造セル幅、ダイシング寸法、整合層厚をパラメータとして最適計算を行った。その結果に基づいて試作した探触子の送信及び受信感度は市販品に比べてそれぞれ1.63倍と2.21倍の値を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, an air-coupled ultrasonic transducer is optimally designed on the basis of numerical finite element analyses, in order to improve the efficiency of transmission and receipt processes in air-coupled ultrasonic testing, which is one of non-contact nondestructive methods. The key point of the proposed optimal design method is not only to estimate best thicknesses of matching layers but also to introduce shape processing using dicing technique for a matching layer. Three-dimensional numerical analysis is carried out for a single cell of periodic structures with dicing interval to find optimal parameters for periodic cell interval, dicing dimensions and matching layer thicknesses. A prototype of air-coupled transducer based on the numerical analysis shows 1.63 and 2.21 times sensitivities of transmission and receipt, respectively, compared with the commercial one.

研究分野：応用力学

キーワード：空気超音波 最適設計 ダイシング技術 有限要素法 非接触非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

1950年代後半から1970年代前半の高度経済成長期に建設された土木構造物や産業設備などの社会インフラの多くが供用後50年以上を迎え、更新期を迎えている。これらの構造物・設備の数は膨大であり、計画的に更新しなければならないが、そのためには効率の良い非破壊検査手法を用いて、構造物や設備の状態を的確に点検・診断する必要がある。超音波探傷検査は内部を探傷する手法としてよく用いられているが、一般的に接触媒質を介して送受信探触子から構造物へ波を伝搬させるため、検査効率が低いとされる。

一方、空気超音波法は空気を接触媒質とするため、検査の自動化などへの応用も含め、効率的な非破壊検査の実現に大きく貢献することが期待されている。しかしながら、空気と固体の音響インピーダンスの差が大きいため、これまで十分な送受信感度が得られず、その適用範囲は複合材料などに限定されてきた。近年は、探触子や計測機器の性能の向上により、鋼板材やパイプなど適用範囲を広げているが、コンクリートなどの土木構造物への適用はほとんどなされていない。

2. 研究の目的

空気超音波法において、空気と検査対象物間の音響インピーダンス差の改善を図ることは難しいものの、空気超音波探触子の構造を工夫することによって、空気超音波の送受信効率を向上させることは可能である。空気超音波探触子は圧電素子の振動によって超音波を送受信するが、圧電素子と空気との音響インピーダンスの差を緩和させるために、整合層とよばれる緩衝材料を挿入するのが一般的である。しかし、これまでの整合層の設計は経験に基づいて行われており、数値解析を用いることによって、より効率的な探触子の設計・製作が実現できると期待される。

そこで本研究では、有限要素解析を援用して空気超音波探触子を最適設計する。特に、整合層の厚さのみならず、形状加工をも組み合わせ合わせた探触子の最適設計手法を提案し、送受信性能の向上を試みる。

3. 研究の方法

本研究で用いる整合層の形状加工は、図1に示すように固体材料に縦横の規則的な溝を入れるダイシングと呼ばれる手法である。こ

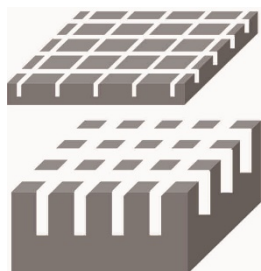


図1 ダイシングによる形状加工.

のような発想に至ったのは、事前検討において空気層に近い整合層の密度を減少させると、より高い送受信効率を得られることがわかってきたからである。本研究では、このダイシング技術を図2(a)に示すように、空気超音波探触子にある2つの整合層の内の整合層1の下部に導入した。圧電素子-ダイシングを施した整合層1-整合層2はそれぞれ接着剤で密着する。

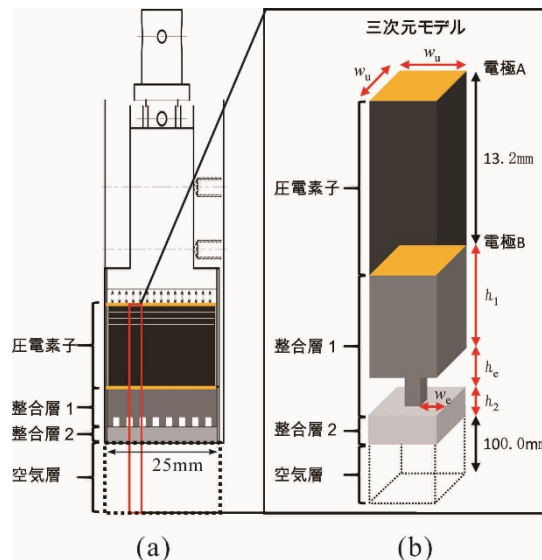


図2 探触子内部のモデル化.

数値解析には有限要素法を用いた。圧電素子は圧電弾性固体、整合層及び空気層はいずれも等方弾性体として有限要素モデルを構築した。用いた整合層及び空気層の材料定数は表1に示す通りであり、圧電弾性固体の材料定数は引用文献①を参照した。また、減衰項は系全体に関する損失マトリクス[C]を質量マトリクス[M]に比例する形で、 $[C]=2h\omega[M]$ によって与えた。ただし、予備実験より $h=0.035$ とし、 ω は入力正弦波の角周波数とした。

表1 整合層及び空気層の材料定数

	整合層1	整合層2	空気層
密度(kg/m ³)	550	200	1.29
縦波速度(m/s)	2600	1000	340
ポアソン比	0.32	0.28	0.49999

図2(a)に示すように、探触子内部の圧電素子及び整合層は25mm×25mmの正方断面を有する有限な3次元固体である。しかし、その形状を忠実に再現して数値解析する場合、膨大な計算メモリを要する。そこで本研究では、整合層のダイシング間隔に合わせて、圧電素子と整合層が水平二方向に周期的な構造を有していると仮定して、図2(b)のような周期構造の1ユニット分のモデルを対象に三次元解析を実施した。モデル側面には周期境界条件を課し、空気層の底面は無反射境界条件としている。

このような三次元モデルにおける設計パラ

メータは、ユニットセル幅 w_u 、ダイシング幅 w_e 、ダイシング深さ h_e 、整合層 1 の層厚 h_1 、整合層 2 の層厚 h_2 の 5 個である。

解析は圧電素子の上下面の電極 A-B 間に周波数 100kHz、電圧 100V の正弦波を 10 周期分入力することによって圧電素子を振動させ、空気層の底面における鉛直方向の絶対変位の平均値を求めた。このように求めた絶対変位は送信探触子の性能を表す尺度と考えられるが、送信と受信は相反関係にあり、送信の解析によって得られた空気層の変位は受信探触子の感度と同じ尺度を持つことから、空気層の底面における絶対変位の平均値のみによって空気超音波探触子の送受信の感度を評価することができる。

4. 研究成果

(1) 空気超音波探触子の最適設計

前述の 5 つの設計パラメータを変化させて、探触子の送受信感度、すなわち、空気層底面における絶対変位の平均値が最大となるパラメータの組合せを求めた。ただし、探触子の製作条件を考慮して、5 つのパラメータの変動し得る範囲と変動幅は表 2 の通りとした。

その結果、 $w_u=1.2$ 、 $w_e=0.5$ 、 $h_e=0.1$ 、 $h_1=5.5$ 、 $h_2=0.3$ [単位は mm] のとき、探触子の感度が最大となることがわかった。以降、これらのパラメータを用いたモデルを「提案モデル」という。

表 2 形状パラメータの変動範囲と変動幅

$0.4 \leq w_u \leq 2.0$	$\Delta w_u = 0.2$
$0.1 \leq w_e \leq (w_u/2 - 0.1)$	$\Delta w_e = 0.1$
$0.1 \leq h_e \leq 0.5$	$\Delta h_e = 0.1$
$0.5 \leq h_1 \leq 10.0$	$\Delta h_1 = 0.5$
$0.3 \leq h_2 \leq 2.0$	$\Delta h_2 = 0.1$

(単位 mm)

(2) 空気超音波の送受信過程の数値解析

次に、後に述べる一対の空気超音波探触子を対面配置した送受信実験に対応させるために、図 3 に示すように、送信と受信の別に有限要素解析を行った。送信の解析では、送信探触子内の圧電素子の上下面の電極 A-B 間に周波数 100kHz、電圧 100V の正弦波を 10 周期分入力することによって圧電素子を振動させ、送信探触子直下の変位を計算する。一方、受信の解析では、送信の解析において得られた探触子直下の節点変位を空気層底面における入射波として対応する節点に与え、受信探触子における圧電素子の電圧を計算した。

図 4(a) の赤線は、送信探触子として形状加工を有する提案モデルを用い、受信探触子として既存の市販品のモデルを用いたと仮定したときの、受信電圧の時間変化の解析結果を表している。ここに、既存の市販品のモデル

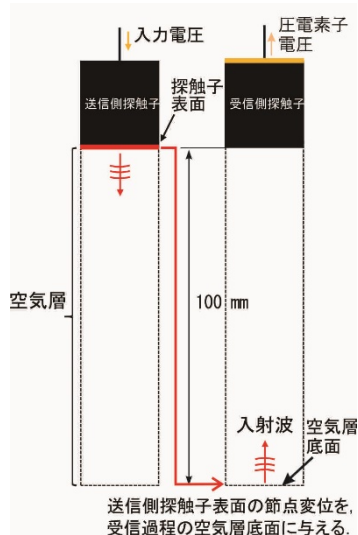


図 3 (a)送信および(b)受信の解析。

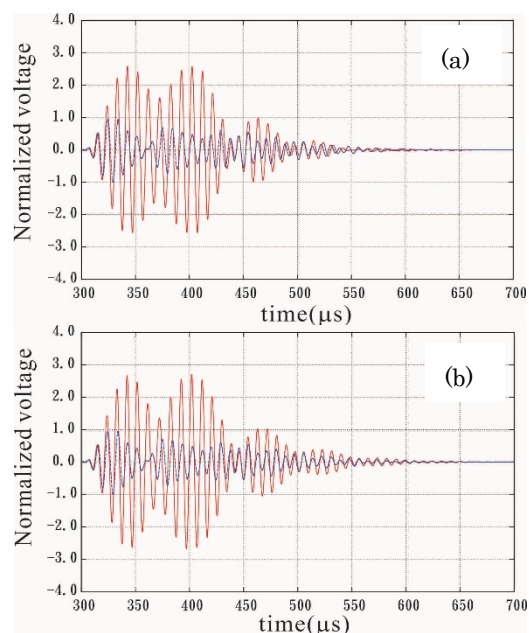


図 4 (a) 送信探触子を提案モデル、受信探触子を市販品モデルとした解析結果(赤線)と送受信探触子ともに市販品モデルとした解析(青線)。(b) 送信探触子を市販品モデル、受信探触子を提案モデルとした解析結果(赤線)と送受信探触子ともに市販品モデルとした解析結果(青線)。

は、それぞれ 13.2mm、6.5mm、2.5mm の厚さを持つ圧電素子、整合層 1、整合層 2 を接着させたもので、整合層の形状加工は施されていない。同様に、図 4(a) の青線は、送信探触子及び受信探触子のいずれも既存の市販品のモデルとしたときの受信電圧の時間変化を表している。したがって、同図の青線に対する赤線の電圧比が既存の市販品に対する提案モデルの送信性能の増幅率と考えることができる。図 4(b) の赤線は、送信探触子として既存の市販品のモデルを用い、受信探触子として提案モデルを用いた場合の受信電圧の時間変化の解析結果である。同図の青線は図 4(a) の青線

と同様、送信探触子と受信探触子の両方に、既存の市販品のモデルを用いたときの結果である。ここで改めて、市販品モデルにおける最大電圧に対する提案モデルの最大電圧の比を、提案モデルの感度増幅率と定義すると、提案モデルの送信及び受信探触子としての感度増幅率はそれぞれ、2.59 および 2.69 となった。

(3) 空気超音波の送受信実験

数値解析によって得られた提案モデルに合わせて、空気超音波探触子を試作し、超音波の送受信実験を行った。図 5 に示すように、一对の空気超音波探触子を 100mm 離して対面させ、送信探触子に、周波数 100kHz、電圧 100V で 10 周期分の正弦波を入力電圧として与えて、受信探触子における電圧波形を計測した。

図 6(a)の赤線は、送信探触子として提案モデルの探触子を用い、受信探触子として既存の市販品を用いたときに計測された受信電圧波形である。同図の青線は、送受信の探触子ともに既存の市販品を用いたときの受信電圧波形である。一方、図 6(b)には、送信探触子として既存の市販品を用い、受信探触子に提案モデルを用いたときの受信電圧(赤線)と、送受信ともに既存の市販品を用いたときの電圧波形(青線)を示している。

以上の結果から、実験において得られた提案モデルの送信及び受信探触子としての感度増幅率はそれぞれ、1.63 および 2.21 となった。

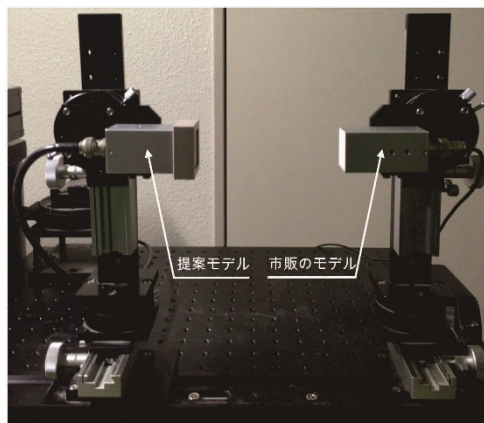


図 5 空気超音波の送受信実験。

(4) 考察

数値解析と実験のいずれにおいても、提案モデルは既存の市販品よりも感度が増幅しており、数値解析による最適設計及びダイシングによる整合層の形状加工によって空気超音波探触子の送受信性能が向上することがわかった。しかし、数値解析と実験の感度増幅率を比較すると、送受信のいずれに対しても数値解析の方が実験値に対して過大評価する結果となっている。この原因については、周期条件を用いたモデル化や減衰項の取扱いの妥当性、及び、試作品における整合層の材料の

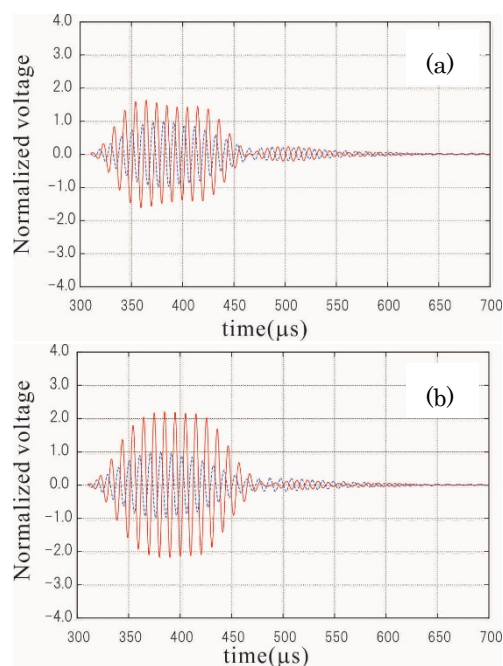


図 6(a) 送信探触子を提案モデル、受信探触子を市販品モデルとした実験結果(赤線)と送受信探触子ともに市販品モデルとした実験結果(青線)。(b) 送信探触子を市販品モデル、受信探触子を提案モデルとした実験結果(赤線)と送受信探触子ともに市販品モデルとした実験結果(青線)。

不均質性などいくつかの要因が考えられるが、詳細については今後検討する必要がある。

さらに、本研究では周波数 100kHz のみならず、200kHz の空気超音波探触子も試作したが、高周波数になると探触子の製作条件がより厳しくなるため、整合層の形状加工による性能は必ずしも向上しなかった。今後、高周波数域での形状加工の効果についても検討が必要である。

<引用文献>

- ①FDK(株)技術資料 圧電セラミックス (<http://www.fdk.co.jp/cyber-j/pdf/BZ-TEJ001.pdf>)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Tinh Quoc Bui, Sohichi Hirose, Chuanzeng Zhang, Timon Rabczuk, Cheng-Tang Wu, Takahiro Saitoh, Jun Lei, Extended isogeometric analysis for dynamic fracture in multiphase piezoelectric /piezomagnetic composites, Mechanics of Materials, 査読有, Vol.97, 2016, pp.135-163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.03.001>.

[学会発表] (計 7 件)

- ①月岡桂吾, 古川陽, 廣瀬壮一, 整合層の形式加工による空気超音波探触子の性能向上に関する検討, 日本非破壊検査協会平成 28 年度秋季大会講演概要集, 2016 年 10 月

- 6日, ハーネル仙台(宮城県仙台市).
- ②月岡桂吾, 古川 陽, 廣瀬壯一, 空気超音波探触子の形状加工に関する基礎的検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, 2016年9月7日, 東北大学(宮城県仙台市).
 - ③Sohichi HIROSE, Numerical wave analysis for advanced nondestructive ultrasonic testing, 2016 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing, 2016年6月22日 Nanchang (China).
 - ④Raphael Lee, Jason Ongpeng, Andres Oreta and Sohichi Hirose, Air-Coupled Ultrasonic Test in Singly-Reinforced Concrete Beam, 5th ASEP Convention on Concrete Engineering Practice and Technology, 2016年5月20日, Manila (Philippines).
 - ⑤Sohichi HIROSE, Advanced nondestructive testing for concrete materials and structures, 5th ASEP Convention on Concrete Engineering Practice and Technology, 2016年5月19日, Manila (Philippines).
 - ⑥月岡桂吾, 古川陽, 廣瀬壯一, 数値計算を用いた空気超音波整合層の設計, 第23回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (一社)日本非破壊検査協会超音波部門, pp.97-98, 2016年1月28日, 日本非破壊検査協会(東京都江東区).
 - ⑦月岡桂吾, 古川陽, 廣瀬壯一, 反射・透過係数法を用いた境界要素法による積層構造の弾性波動解析, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, 2015年9月16日, 岡山大学(岡山県岡山市).

[その他]

ホームページ等

<http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣瀬 壯一 (HIROSE, Sohichi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：00156712

(2) 研究分担者

古川 陽 (FURUKAWA, Akira)

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：60724614