

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360213

研究課題名 (和文) 小径ボアホール音波計測による高精度材料評価

研究課題名 (英文) Highly Accurate Material Evaluation Using Acoustic Wave Measurement in Small Size Bore Holes

研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE SOHICHI)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：00156712

研究成果の概要：

本研究では、超音波を用いた高精度な材料評価を目的として、まず、演算子積分法時間領域多重極積分方程式、異方弾性体に対する基本解、EFIT 法の 3 つの効率的かつ高精度な波動解析技術を開発した。次にボアホール内の波動場の数値シミュレーションを行なって漏洩表面波やガイド波の特性を明らかにし、計測によって漏洩表面波を用いた材料評価の有効性を示した。さらにより高度な材料評価法としての線形化逆散乱解析と TG 法を開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2007 年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：超音波，材料評価，波動解析，逆解析，欠陥形状再構成

## 1. 研究開始当初の背景

既存構造物の経年変化に伴う維持管理技術が重要となる中、土木材料の品質保証のための非破壊検査技術の信頼性と精度の向上が大きな課題となっている。そのような中、超音波や音波などの波動を用いた非破壊検査手法は構造物の表面から内部の状態を安全に検査できる数少ない手法の一つとして注目されている。

コンクリートや地盤・岩盤の材料定数を定める際にはしばしばコア抜きやボーリングなどによって円柱供試体を抜き取って破壊試

験が行なわれる。最近では、コンクリート構造物に対してできるだけ構造物に損傷を与えないように、小径コアやドリル穴による試験が行われつつあるが、このような試験のあとに残った穴の側面は材料内部に形成された新たな材料表面であるとみなすことができる。したがって、小径の穴において超音波測定を実施し、音波計測あるいはより詳細な波形解析を行えば材料内部のより詳細な評価が可能になると考える。

一方、石油資源探査の分野では以前からボアホール内において音波検層と称される音

波計測によって岩盤の材料特性の推定が行なわれてきた。そこで、石油資源探査の分野でよく発達している音波検層技術を土木構造物材料に空けられた小径ボアホールにおける音波計測に応用すればより高い精度の材料評価が可能になると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、石油資源探査における音波検層技術を土木構造物材料に応用するための解析理論を構築し、材料評価の高精度化のための基盤を構築することである。一般に石油資源探査では数 kHz から数十 kHz の周波数の音波が用いられるのに対し、小径ボアホールでは数 10 kHz ~ 数百 kHz の超音波を用いることになる。したがって、石油資源探査で用いられる計測技術をそのまま適用することはできない。そこで本研究では、まず効率的な超音波の数値解析技術を開発し、それを用いてボアホール内における超音波波動場の数値シミュレーションを行う。また、数値シミュレーション結果を検証するための実験を実施するとともに、より高度な材料評価のための逆解析手法を開発する。

## 3. 研究の方法

### (1) 効率的な波動解析技術の開発

波動解析技術としてはすでに様々な解法があるが、ここでは、積分方程式法をとりあげ、効率的で安定な解が得られるように演算子積分法と多重極積分方程式を組み合わせた解法を開発する。また、異方弾性体にも対応できる基本解と非均質異方弾性体における波動解析に有効な EFIT (動弾性有限積分法) を開発する。

### (2) 数値シミュレーションと実験計測

(1) で開発した波動解析技術を用いて数値シミュレーションを行う。特にボアホール内における波動場を詳細に検討するとともに、漏洩表面波を用いた超音波実験を行う。

### (3) 材料評価のための高精度逆解析法の開発

アレイ探触子を用いた多点計測波形から材料内部の欠陥を高精度でイメージングする技術として、高速フーリエ変換を用いた線形化逆散乱解析と TG 法 (形状微分法) を開発し、数値シミュレーション結果や計測波形に適用してそれらの有効性を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 開発した波動解析技術

#### ① 演算子積分時間領域高速多重極境界要素法

時間域での積分方程式では時間に関する繰込み積分が出現するが、Lubich の演算子積分法を用いると繰込み積分を重み付き加算和で精度よく評価できる。例えば繰込み積分  $f(t) * g(t)$  は時間  $t = n\Delta t$  において以下のように

に表せる。

$$f(n\Delta t) * g(n\Delta t) \square \sum_{j=0}^n w_{n-j}(\Delta t) g(j\Delta t) \quad (1)$$

ただし、 $w_n(\Delta t)$  は関数  $f(t)$  のラプラス変換を用いた和によって表される重み関数である。

材料内の波動の解析のための時間領域境界積分方程式は、 $u_j, t_j$  を変位と表面力、 $U_{ij}, T_{ij}$  を変位と表面力の基本解とするとき次式で表される。

$$\int_S U_{ij}(x, y, t) * t_j(y, t) dS_y - \int_S T_{ij}(x, y, t) * u_j(y, t) dS_y = \begin{cases} u_i(x, t) & x \in D \\ u_i(x, t)/2 & x \in S \\ 0 & x \notin \bar{D} \end{cases} \quad (2)$$

なお、 $D$  と  $S$  は材料の領域とその境界である。

式 (2) の繰込み積分に式 (1) の演算子積分法を適用すると時間積分を精度よく評価することができる。また、繰込み積分における重み関数が基本解のラプラス変換で表されることから材料表面  $S$  に関する積分は高速多重極法を用いることによって高速に評価することができる。このため上記の積分方程式を直接法ではなく反復法を用いて解くことができ、大規模計算が可能となる。

図 1 は無限弾性体中にある 64 個の空洞群に対して平面 P 波が左側から入射したときの散乱の様子を演算子積分時間領域高速多重極境界要素法を用いて解析した結果である。このように開発した手法を用いれば複雑な形状をした大規模な散乱問題も容易に解析できる。

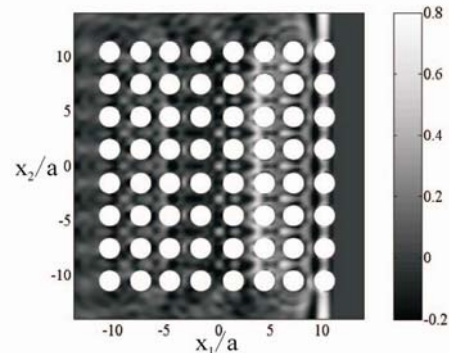


図 1 空洞群による平面 P 波の散乱。

#### ② 異方性材料における基本解

式 (2) の積分表現は解くべき問題に適した基本解を用いれば、問題が線形である限りいかなる問題にも適用可能である。2 次元問題に対してはすでに既往の研究がある。3 次元異方弾性体の場合には基本解は次のように表される。

$$U_{ij}(x, y, t) * f(t) = U_{ij}^S(x-y)f(t) + U_{ij}^R(x-y, \dot{f}(t)) \quad (3)$$

ただし,

$$U_{ij}^S(x-y) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{|\mathbf{n}|=1} \Gamma_{ij}^{-1}(\mathbf{n}) \delta(\mathbf{n} \cdot (\mathbf{x}-\mathbf{y})) d\mathbf{n}$$

$$U_{ij}^R(x-y, f(t)) = \frac{-1}{8\pi^2} \int_{|\mathbf{n}|=1} \sum_{l=1}^3 \frac{P_{ij}^l(\mathbf{n})}{\rho c_l^3} f(t - c_l^{-1} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{x}-\mathbf{y})) d\mathbf{n} \quad (4)$$

である. ここに,  $\Gamma_{ij} = C_{ipjq} n_p n_q$  ( $C_{ipjq}$  は弾性定数) であり,  $P_{ij}^l$  は  $P_{ij}^l = A_{ij}^l / A_{mm}^l$  ( $A_{ij}^l = \text{adj}[C_{ipjq} n_p n_q - \rho c_l^2 \delta_{ij}]$ ),  $c_l$  は波速である. 式(4)のように 3次元異方弾性体の基本解の評価には球面  $|\mathbf{n}|=1$  での積分を必要とする. 理論的には式(4)によって基本解を計算し, 式(2)に代入すれば任意の波動問題を解くことができるが, 現時点では基本解自体の計算負荷が大きいため, 式(2)の境界積分方程式を用いた実用的な3次元異方性体での波動解析は今後の課題となっている.

### ③ EFIT

EFIT は波動場の領域を小要素に分割して, 局所的な要素内での運動方程式と構成方程式の体積積分から差分的な離散式を導いて解く解法である. 要素ごとに異なる材料定数を与えることができるので, 一般的な非均質異方性材料での波動に対しても安定した解が得られる.

図2は不均質異方性な溶接部の断面写真を用いて画像を取り込み, 画像ピクセルごとに材料定数を変化させた数値モデルを作成してEFITを用いて解析した結果である. 複雑な溶接部も容易に解析を行うことが可能となっている.

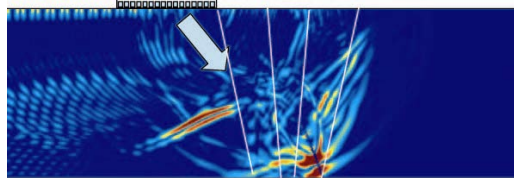


図2 不均質異方性を持つ溶接部における超音波の挙動.

## (2) 数値シミュレーションと実験計測

### ① 数値シミュレーション結果

(1)で開発した波動解析技術を用いて, ボアホール内の波動場を数値計算した. 解析モデルを図3に示す. ボアホールは水で満たされ, 両側は異方性固体と接している.

図4は固体の弾性定数を等方性(上図)と横等方性(下図)とした場合の受信点における圧力の時間変化を比較して示している. いずれの図にも水-固体-水の経路で伝搬する漏洩表面波とボアホールを導波管として伝搬するガイド波の2種類の波が存在することがわかる. 図4の上下図を比較すると, 後から到達するガイド波の伝搬挙動は弾性定数が変化してもほとんど変わらないのに対し, 最

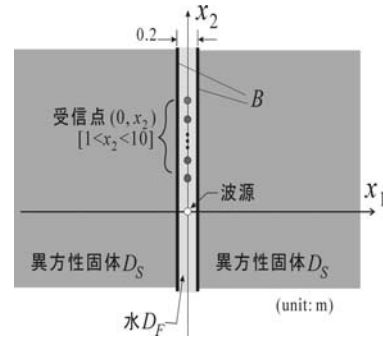


図3 ボアホールの解析モデル.

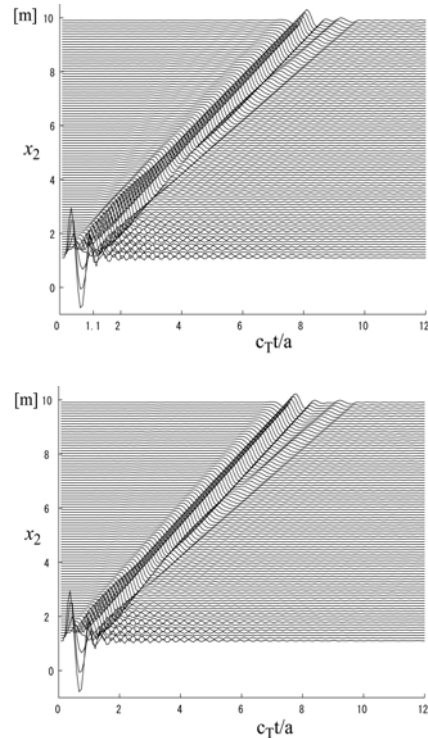


図4 受信点における圧力の時間変化. 上図: 等方性, 下図: 鉛直方向の弾性定数が水平方向に比べて大きい横等方性の場合.

初に到達する漏洩表面波は固体の弾性定数の影響を受けて到達時間や波形が変化していることがわかる. したがって, 計測波形から周辺の固体材料の特性を求めるには漏洩表面波を用いるべきであるといえる.

### ② 実験計測結果

図5に示すように一部に剥離部分を有するモルタル-鋼板から成る試験体に対して, 水中での漏洩表面波を用いた超音波計測を実施し, モルタルと鋼板の界面での剥離部の検出を試みた. 漏洩表面波の振幅の変動を用いて図6の上図に示すモルタル-鋼板の剥離部の輪郭の再現をした結果を下図に示す. 剥離部がよく再現できていることがわかる.

## (3) 材料評価のための高精度逆解析法の開発

### ① 線形化逆散乱解析

線形化逆散乱解析とは式(2)の波動場の積

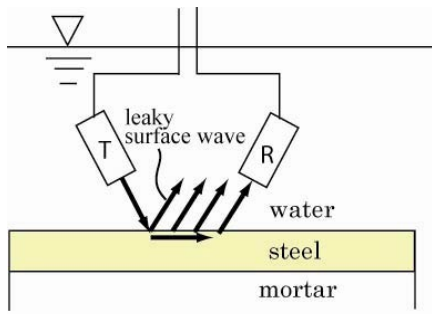


図5 漏洩表面波による超音波計測

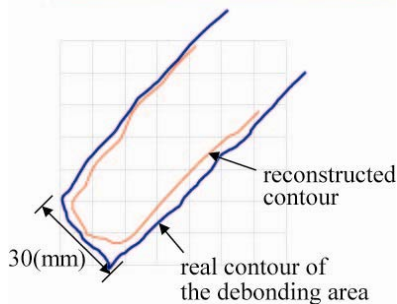
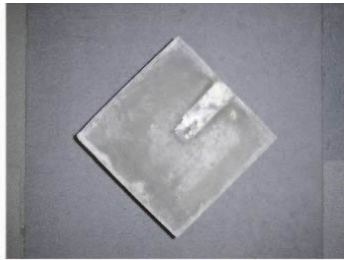


図6 モルタル-鋼板の剥離部の写真(右上の部分)と再現された剥離部の輪郭。

分表現に適切な近似を導入して、材料表面で得られた散乱波から内部の欠陥の形状を再現するものである。具体的には、式(2)の境界  $S$  上の波動場に Kirchhoff 近似を導入すると、 $S$  上でのみ値を持つ特異関数  $\gamma(\mathbf{x})$  の空間に関するフーリエ変換  $\Gamma(\mathbf{K})$  と散乱波の波形の間に線形関係を見出すことができる。よって散乱波の波形から得られた  $\Gamma(\mathbf{K})$  を逆フーリエ変換することによって  $\gamma(\mathbf{x})$  を再現することができる。本研究ではこれらの波形処理を高速フーリエ変換を用いて行い、欠陥形状の再構成の高速化を図った。

図7は4つの横穴に対するアレイ計測のシミュレーションを行い、その数値データを用いて、波形処理をせずに波形を並べただけのBスキャン画像と線形化逆散乱解析によって得られた画像を比較したものである。後者の手法によって欠陥画像の精度が向上していることがわかる。

## ② TG法(形状微分法)

TG法は計測と解析の両者の差の二乗和が小さくなるように欠陥表面に小穴をあけることによって欠陥形状を再構成しようとするものである。小穴の位置の決定には入射速度場と計測と解析の差を逆伝搬させた速度

場による仮想仕事からなる形状微分関数を用いる。

図8は横穴の上面に設置されたアレイ探触子を用いて得られた超音波波形にTG法を適用してあけられた小穴を示している。良い精度で横穴の境界が再現されていることがわかる。

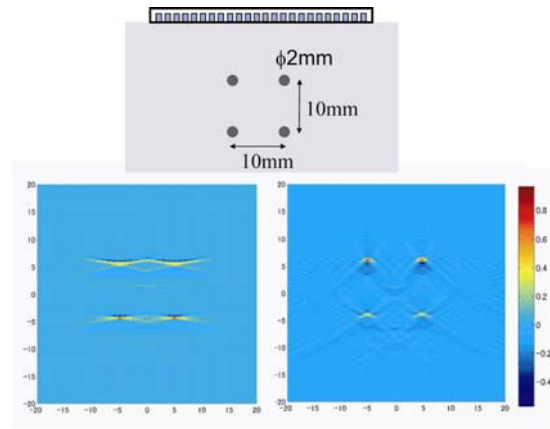


図7 複数の横穴に対するBスキャン画像(左)と線形化逆散乱解析による画像(右)。

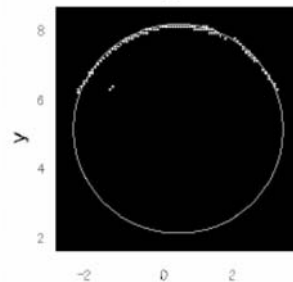
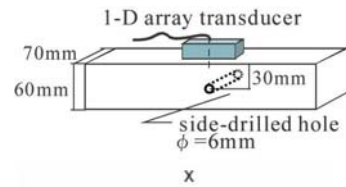


図8 TG法によって再現された横穴の境界。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

① M. Wünsche, Ch. Zhang M. Kuna, S. Hirose, J. Sladek and V. Sladek, A hypersingular time-domain BEM for 2D dynamic crack analysis in anisotropic solids, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 78, pp.127-150, 2009, 査読有。

② K. Nakahata, J. Tokunaga, K. Kimoto and S. Hirose, A Large Scale Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Concrete Using Parallelized EFIT, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 2, pp.1462-1469, 2008, 査読有。

③ S. Beyer, Ch. Zhang, S. Hirose, J. Sladek and V. Sladek, Transient dynamic analysis of interface cracks in 2-D anisotropic elastic solids by a

time-domain BEM, Advances in Boundary Element Techniques, Vol. IX, pp. 419-426, 2008, 査読無.

④ Chihiro Matsuoka, Kazuyuki Nakahata, Atsushi Baba, Naoyuki Kono, and Sohichi Hirose, Comparative study on ultrasonic imaging methods with array transducers, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 27, pp. 707-714, 2008, 査読無.

⑤ Kazushi Kimoto and Sohichi Hirose, Flaw shape reconstruction using topological gradient for 2D scalar wave equation, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 27, pp. 672-279, 2008, 査読無.

⑥ Alan T. Tan, Sohichi Hirose, 3D time domain boundary element formulation for anisotropic elastic solid, 計算数理工学論文集, Vol. 7, pp. 285-290, 2008, 査読有.

⑦ 斎藤隆泰, 石田貴之, 福井卓雄, 廣瀬壮二, 演算子積分法および高速多重極法を用いた新しい二次元時間領域動弾性境界要素法について, 応用力学論文集, Vol. 11, pp. 193-200, 2008, 査読有.

⑧ S. Hirose, U. Ushida and C.-Y. Wang, BEM Analysis of Wave Propagation in a Water-Filled Borehole in an Anisotropic Solid, Tsinghua Science and Technology, Vol. 12, pp. 400-406, 2007, 査読有.

⑨ M. Wünsche, Ch. Zhang, J. Sladek, V. Sladek and S. Hirose, Interface crack in anisotropic solids under impact loading, Key Engineering Materials, Vol. 348-349, pp. 73-76, 2007, 査読有

⑩ 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壮一, 逆散乱解析法の超音波フェーズドアレイ探傷への応用, 応用力学論文集, Vol. 10, pp. 61-68, 2007, 査読有.

⑪ A. Tan, S. Hirose and Ch. Zhang, Numerical Solution for the Explicit 3D Time Domain Fundamental Solutions for Anisotropic Solids, Advances in Boundary Element Techniques, Vol. VIII, pp. 7-12, 2007, 査読無.

[学会発表] (計 10 件)

① 上甲智史, 中畑和之, 廣瀬壮一, 全波形サンプリング (FSAT) 方式を用いた欠陥画像化のための逆散乱イメージング法の提案, 第 16 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, 2009. 1. 29, 東京.

② 牛尾賢司, 徳永淳一, 中畑和之, 木本和志, 廣瀬壮一, EFIT によるコンクリート中の弾性波のシミュレーションと伝搬特性の評価, 日本非破壊検査協会平成 20 年度秋季講演大会講演概要集, 2008. 11. 5, 多賀城市.

③ Tan Alan, Sohichi Hirose, 2D time domain BEM analysis for interface crack with

contact-boundary conditions, 第 57 回理論応用力学講演会論文集, 2008. 6. 11, 東京.

④ Sohichi Hirose, Ultrasonic imaging of defects in materials and structures, 2008 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing, 2008. 6. 7, 南京.

⑤ 周永恵, 廣瀬壮一, SAFT による欠陥画像の高精度化について, 日本非破壊検査協会平成 20 年度春季講演大会講演概要集, 2008. 5. 21, 東京.

⑥ Alan T. Tan and Sohichi Hirose, Time domain BEM analysis of a cylinder embedded in soil with anisotropy, Fifth International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2008. 3. 5, 東京.

⑦ 徐 森鑫, 廣瀬壮一, 木本和志, C.-Y. Wang, 水-異方性固体界面での波動伝搬解析, 日本非破壊検査協会平成 19 年度秋季講演大会, 2007. 10. 19, 札幌.

⑧ 木本和志, 廣瀬壮一, 時間領域における線形化逆散乱解析法を使った超音波イメージング, 日本非破壊検査協会平成 19 年度春季講演大会, 2007. 5. 23, 東京.

⑨ A. Tan and S. Hirose, Wave propagation in 2D anisotropic layered media using boundary element method, Proc. Fourth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2007. 3. 6, 東京.

⑩ A. Tan and S. Hirose, 2D dynamic analysis of interface cracks in anisotropic elastic solids, 日本応用数理学会 2006 年度年会講演予稿集, 2006. 9. 16, 筑波.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣瀬 壮一 (HIROSE SOHICHI)  
東京工業大学・大学院情報理工学研究所  
・教授

研究者番号：00156712

### (2) 研究分担者

中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI)  
愛媛大学・大学院理工学研究所・准教授  
研究者番号：20380256

木本 和志 (KIMOTO KAZUSHI)  
岡山大学・大学院環境学研究科・准教授  
研究者番号：30323827

### (3) 連携研究者

該当者なし