

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820183

研究課題名(和文) 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する境界要素法の開発

研究課題名(英文) Development of boundary element method for analysis of waves in 3-D general anisotropic fluid-saturated porous solids

研究代表者

古川 陽 (Furukawa, Akira)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：60724614

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、岩盤の重要な性質を考慮した波動解析手法の開発を目的に、異方性飽和多孔質弾性体に対する境界要素法の開発を行った。はじめに、異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する基本解を導出し、続けて、導出した基本解を用いた周波数領域境界要素法の開発を行った。開発手法を用いて、異方性飽和多孔質弾性体内部の空洞による入射波の散乱解析を行い、本手法の有効性を確認した。また、開発した境界要素法をもとに、等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の動的連成解析のための境界要素法の開発を行った。この手法を用いて、等方弾性体から異方性飽和多孔質弾性体へ入射する屈折波の計算を行った。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a boundary element method for 3-D wave analysis in fluid-saturated porous solids. Waves in rocks under the ground have the following properties: anisotropy, dispersion, and dissipation. Since anisotropic fluid-saturated porous solids can treat these properties, development of a method for wave analysis using the solids has been required. In this study, a fundamental solution for 3-D wave problem in anisotropic fluid-saturated porous solids has been derived firstly. Using the fundamental solution, we developed a frequency-domain boundary element method for wave scattering in the porous solids. Subsequently, a boundary element method for dynamic coupled analysis of isotropic elastic and anisotropic fluid-saturated porous solids was developed. The boundary element methods were applied to some examples, and the results showed the validity of the proposed methods.

研究分野：工学

キーワード：境界要素法 飽和多孔質弾性体 異方性 波動

1. 研究開始当初の背景

岩盤に対する波動解析は、様々な分野で利用されている。資源探査では、貯留層の探査や水圧破砕によって生じる割れ目の推定（マイクロサイスミック）に用いられ、その結果は、石油等の産出量の予測に利用される。また、トンネル掘削においては、掘削経路上の破砕帯の検出に用いられ、その結果は、工期遅延の防止および掘削時の安全性の向上のための対策に利用される。

岩盤を伝播する波動は、岩石の有する異方性および間隙流体の影響を受ける。異方性は、媒質の力学的性質が方向によって異なる性質であり、岩石の生成過程や、地中で封圧を受けることで生じる配向性のき裂等が原因となり生じる。また、岩盤は多孔質構造を有していることが知られており、多くの場合、その空隙は地下水や油で満たされている。そのため、岩盤は固体相である岩石と液体相である間隙流体によって構成される混合体と考えることができる。一般に、このような媒質は、異方性飽和多孔質弾性体と呼ばれる。

異方性飽和多孔質弾性体中を伝播する波動は、異方性、分散性、および散逸性を有する。また、これらの性質が異なる4種類の波動が存在することが知られている。このような背景から、これまで、異方性飽和多孔質弾性体の波動解析のための汎用性の高い数値解析手法の開発は行われていなかった。

これに対して研究代表者らは、異方性飽和多孔質弾性体の2次元波動問題に対する時間領域境界要素法の開発を行い、一定の成果を上げてきた。このとき、境界要素法の定式化に必要な基本解を独自に導出し、異方性飽和多孔質弾性体中の空洞による散乱解析を行った。そして、より現実的な問題を取り扱うため、3次元解析および他媒質との連成解析の必要性を確認した。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、以下に示す項目の達成を、本研究の目的とした。

(項目1) 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動解析のための数値解析手法の開発

(項目2) 等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の3次元動的連成解析手法の開発

項目1は、異方性飽和多孔質弾性体に対する基礎的な解析、項目2は、実際に異方性飽和多孔質弾性体が存在する地中を想定した解析に該当する。開発を行う解析手法を用いて、岩盤の異方性に関する影響、間隙流体の粘性や浸透性に着目した考察を行い、異方性飽和多孔質弾性体中の波動の伝播・散乱現象に関する知見を得る。

3. 研究の方法

本研究で開発を行う数値解析手法は、周波数領域境界要素法とする。境界要素法は、波動解析に対して有効な解析手法であり、媒質の物理現象（波動伝播、熱伝導等）に対応した基本解と境界上の物理量（変位、表面力等）によって表現される積分方程式を用いた定式化を行う。境界要素法は、境界のみの離散化で近似解を得ることができ、無限領域を容易に取り扱うことができる。また、有限要素法に代表される領域型の離散解析手法と比較して、計算精度が高いことが知られている。その一方で、離散化によって得られる代数方程式の係数行列が密となり、計算負荷が大きくなることが知られている。

項目1の達成のため、異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する境界要素法の開発では、周波数領域解析のための基本解の導出および境界要素法の開発を行った。

はじめに基本解の導出を行った。本研究では、研究代表者らが行った2次元問題に対する基本解の導出方法を用いて、3次元問題に対する基本解の導出を行った。この方法は、Radon変換に基づいており、基本解はRadon逆変換の形式（すなわち、単位球面積分を含む形式）で表現される。一般的な異方性を考えた場合、この積分を解析的に処理することは困難であり、本研究では、数値積分を用いて、基本解の計算を実施した。

次に、周波数領域境界要素法の開発を行った。境界要素法による波動解析に用いる境界積分方程式には、固体骨格部の変位と間隙流体の圧力に関する方程式を用いた。これらの方程式は、2次元問題の定式化と同様に導出した。空間に関する離散化には、要素内一定の形状関数を用いた。これに伴い数値計算用プログラムを作成し、実際に入射の散乱問題の解析を行った。

項目2の達成のため、等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の動的連成解析のための境界要素法の開発を行った。

はじめに、動的連成解析のための境界要素法の定式化を行った。異方性飽和多孔質弾性体に対する積分方程式は、項目1で導出した方程式を用いた。また、等方弾性体に関しては、最も一般的な、変位に関する境界積分方程式を用いた。両者の界面における境界条件として、変位および応力の連続性、飽和多孔質弾性体から等方弾性体への間隙流体の流入が発生しない非浸透性を考慮した。以上の積分方程式と境界条件を用いることによって、境界上の変位、表面力、間隙流体の圧力を求めた。その後、数値計算プログラムを作成し、等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の界面における屈折波の計算を行った。解析結果は、理論計算によって得られる屈折角と比較し、本手法の検証を行った。

4. 研究成果

はじめに、項目 1 に該当する、異方性飽和多孔質弾性体の 3 次元波動問題のための境界要素法による解析結果を示す。ここでは、異方性飽和多孔質弾性体によって構成される無限領域に存在する空洞による入射波の散乱解析を行った。異方性飽和多孔質弾性体として、横等方性材料であるの砂岩とし、間隙流体は海水とした。また、空洞の境界条件は、表面力フリーおよび境界からの流出量がゼロとなるように設定した。

解析結果として、qP1 波を入射させた場合の散乱波の空間分布を示す。図 1 は固体骨格部の変位の x_1 成分の実部を、図 2 は間隙流体の圧力の実部を表している。これらの結果より、散乱によって生じる qP1 波および境界におけるモード変換によって生じる qS2 波の存在が確認できる。

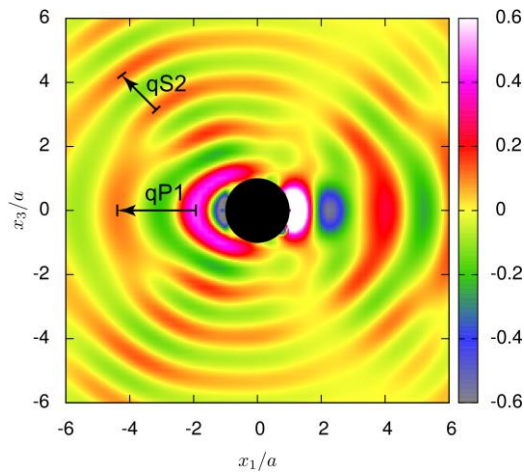


図 1: 平面 qP1 波を入射させた場合の散乱波動場 (固体骨格部の x_1 方向変位の実部)

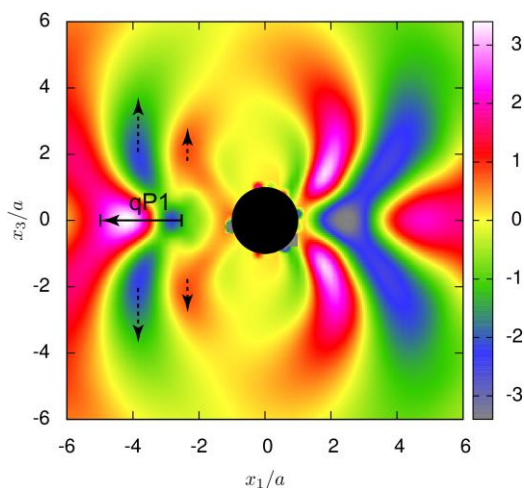


図 2: 平面 qP1 波を入射させた場合の散乱波動場 (間隙流体の圧力の実部)

次に、項目 2 に該当する、等方弾性体と異方性弾性体の動的連成解析の結果を示す。解析に用いた材料は、等方弾性体は硬石膏、異方性飽和多孔質弾性体は砂岩 (横等方性) とし、間隙流体は原油とした。入射波は平面 P 波を仮定し、界面に 45° の角度で入射することとした。

解析結果として、界面近傍における屈折波の空間分布を示す。なお、図 3 は固体骨格部の x_3 軸方向変位の実部の値を、図 4 は間隙流体の圧力の実部の値を、それぞれ示している。また、これらの図において、黒色の線は、入射波および屈折波の進行方向を表している。さらに、黒線上に示されている点の間隔は、対応する波動の波長を表している。これらの結果より、屈折 qP1 波の存在が確認できる。また、図 4 では、界面近傍で間隙流体の圧力が上昇している様子が確認できる。これは、屈折 qP2 波による影響であると考えられる。

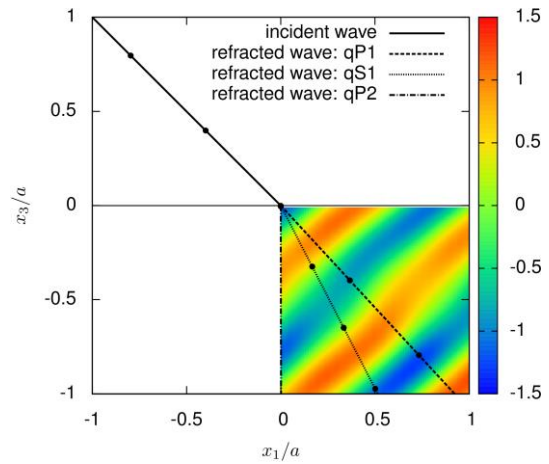


図 3: 平面 P 波を入射させた場合の屈折波の空間分布 (固体骨格部の x_3 軸方向変位の実部)

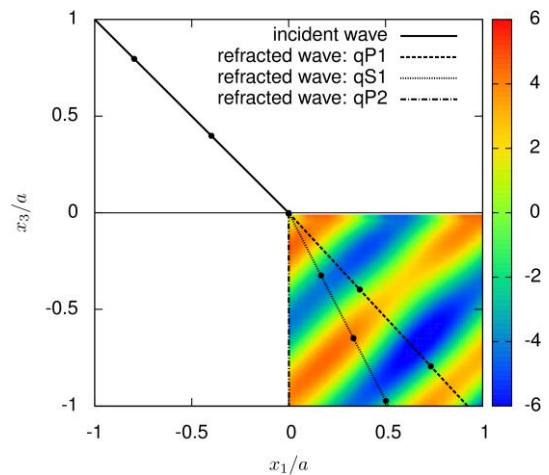


図 4: 平面 P 波を入射させた場合の屈折波の空間分布 (間隙流体の圧力の実部)

以上を踏まえ、本研究のまとめを以下に示す。

- ① 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する周波数領域基本解を導出した。基本解は積分形式で表現されるため、数値計算においては、その積分を数値的に処理する必要がある。この積分計算は、境界要素解析における計算時間に大きな影響を及ぼす。
- ② 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する境界要素法の開発を行い、空洞に対する入射波の散乱解析を行った。その結果、境界における波動のモード変換を確認した。また、間隙流体の圧力に対する波動場は、散乱によって生じるqP2波の影響を受けることが確認された。
- ③ 等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の動的連成解析に対する境界要素法の開発を行い、屈折波の進行方向および波長を、理論解析の結果と比較した。その結果、両者の値は良く一致した。間隙流体の圧力は、界面近傍で上昇することが確認された。この現象には、qP2波が影響しているものと考えられる。
- ④ 解析結果に大きな影響を及ぼすqP2波は、弾性体や粘弾性体による解析では再現できない波動であり、異方性飽和多孔質弾性体を用いた解析は、有意義であることが示された。

一方、本研究を通して得られた課題を以下に示す。

- ① 異方性飽和多孔質弾性体の基本解は積分形式で表現されるため、数値計算において、計算時間の増加を引き起こす。本研究で開発した手法を実問題へ適用するためには、計算コストの削減を実現しなければならない。
- ② 研究代表者らは、異方性飽和多孔質弾性体の2次元波動問題に対する時間領域境界要素法の開発を行っている。3次元問題に対しても、時間領域の解析手法を開発することは有意義である。

今後は、これらの課題を解決に取り組む予定である。

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1件)

- ① 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 異方性飽和多孔質弾性体の3次元弾性波動問題を対象とした周波数領域境界要素法の開発, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 71, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 18), pp. I_255-I_266, 2016. 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対する境界要素法, 計算工学講演会論文集, Vol. 20, CD-ROM 収録(論文番号: E-8-1), 2015. (2015年6月9日, つくば国際会議場)
- ② 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 境界要素法を用いた等方弾性体と異方性飽和多孔質弾性体の動的連成解析, 第19回応用力学シンポジウム講演概要集, USBメモリ収録(原稿番号: 100084), 2016. (2016年5月21日, 北海道大学札幌キャンパス)
- ③ 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 周波数領域境界要素法を用いた異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動散乱解析, 土木学会平成27年度全国大会第70回年次学術講演会講演概要集, DVD-ROM 収録(原稿番号: CS8-019), 2015. (2015年9月16日, 岡山大学津島キャンパス)
- ④ 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 異方性飽和多孔質弾性体の3次元弾性波動問題を対象とした境界要素法の開発, 第18回応用力学シンポジウム講演概要集, USBメモリ収録(原稿番号: 100043), 2015. (2015年5月16日, 金沢大学角間キャンパス)
- ⑤ 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 異方性を有する飽和多孔質体中の波動散乱解析のための周波数領域境界要素法の開発, 日本機械学会第27回計算力学講演会, CD-ROM 収録(原稿番号: 1205), 2014. (2014年11月24日, 岩手大学工学部)
- ⑥ 古川陽, 斎藤隆泰, 廣瀬壮一: 異方性飽和多孔質弾性体の3次元波動問題に対するLaplace像空間における基本解, 土木学会平成26年度全国大会第69回年次学術講演会講演概要集, DVD-ROM 収録(原稿番号: CS11-029), 2014. (2014年9月10日, 大阪大学豊中キャンパス豊中総合学館)
- ⑦ Furukawa, A., Saitoh, T., Hirose, S.: Convolution quadrature BEM for wave analysis in general anisotropic fluid-saturated porous solid and its GPU acceleration, ICCM2014 Conference Proceedings, Paper ID. 423, 2014. (July 29th, 2014, Cambridge, England)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 陽 (FURUKAWA AKIRA)
東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教
研究者番号: 60724614