

超音波計測に基づく花崗岩中の表面波伝播特性に関する研究 A Study on the Propagation Characteristics of Surface Waves in a Granite Based on Ultrasonic Measurement

木本 和志・岡野 蒼 (岡山大・環境生命科学) 斎藤 隆泰 (群馬大・理工学府)
佐藤 忠信 (神戸学院大・現代社会学部) 松井 裕哉 (日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センター)
Kazushi KIMOTO and Aoi OKANO, Okayama University
Takahiro SAITOH, Gunma University
Tadanobu SATO, Kobe Gakuin University
Hiroya MATSUI, Japan Atomic Energy Agency
E-mail: kimoto@okayama-u.ac.jp

This study investigates the propagation characteristics of high frequency surface wave in a granite block by ultrasonic measurement. In the experiment, a surface wave field excited by a line-focus transducer is scanned finely over a rectangular aperture with a laser Doppler vibrometer. From the measured waveforms, the spatial distribution of Fourier phase is reconstructed, and the structure of the wave front configuration is investigated. Due to the heterogeneity of the granite, we find the fluctuation of the wave front measured by the distribution of spatial gradient of phase. The intensity of the fluctuation is quantified as a local wavenumber vector. As the result it is found that the granite sample can be characterized by a stochastic wave number whose probability density is frequency dependent, asymmetric and non-Gaussian with a finite support.

1. はじめに

弾性波試験は材料物性や形状の非破壊評価にしばしば用いられている。建設材料の多くは、物性や形状が不均一なランダムかつ多孔質な媒体である。例えば、岩石は、複数の鉱物種で構成された、き裂やボイドを含む典型的なランダム多孔質媒体である。このような不均質媒体では、弾性波は屈折や散乱により非常に複雑な伝播挙動を示す。そのため、不均質材の弾性波試験の高精度化や信頼性の担保には、材料の不均質性を考慮した波動伝播モデルによるデータ解釈が必要となる。またそのようなモデルは、媒体のランダム性も適切に表現できるものでなければならない。波動媒体の不均質性を表現する際、物性値を平均と偏差成分に分け、偏差成分が既知の確率分布に従うとして解析が行われる。例えば、時間調和な波動場を考える場合、支配波動方程式に含まれる波数の項を、平均値と確率変数としての偏差成分に分離して記述する。このとき、波数の偏差成分がどのような確率分布に従うかは自明でなく、材料に応じて異なる可能性がある。また、確率分布が材料のどのような性質を反映して決まるかということも、弾性波試験の観点からは重要である。これらのことは、理論解析だけでは明らかにすることはできず、現実の材料をランダム不均質媒体としてモデル化するための確率分布は、弾性波の実測データを基に構築する必要がある。

以上を踏まえ本研究では、花崗岩試料用いた超音波計測を行い、実測データから波数ベクトルが従う確率分布を推定する。花崗岩は数 mm～数 cm 程度の結晶粒から成る多結晶質体で、超音波はき裂や粒界で散乱を起こす。そのため、材料の不均質部と強く相互作用する弾性波を室内試験

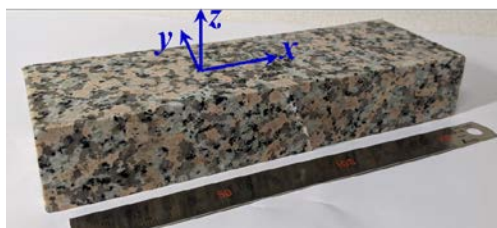


Fig.1 A granite sample for the ultrasonic measurements.

で観測するための実験供試体として利用し易い。ここでは、圧電超音波探触子で花崗岩試料に表面波を励起し、その伝播挙動をレーザー振動計で可視化するとともに、波動場の位相と波数の構造を調べる。以下、超音波計測方法と計測結果、推定した位相の空間分布と、波数ベクトルの確率密度分布を順に示す。

2. 超音波計測手法と計測結果

Fig.1 に実験に用いた花崗岩供試体を示す。試験片は岡山県万成地域の採石場で採取した万成花崗岩をブロック状に切断加工したものである。表面波の励起は、供試体表面に接触させた圧電超音波探触子で行う。探触子は、曲率半径 26.1mm, 投影面積 25mm×40mm の圧電素子をくさび状のシュー材に取り付けたもので、シュー先端部の幅と長さは 2×50mm, 共振周波数は 1MHz である。これは、試験片中に円筒波を発生させ、幾何減衰の影響を小さくすることを意図したものである。試験片は位置を精確に調整するために、水平 2 軸、回転 1 軸の 3 軸ステージ上に固定する。送信探触子は 400V の矩形電圧パルス印加して駆動する。受信にはレーザー Doppler 振動計(LDV)を用い、受信波形をオシロスコープ上で 4,096 回平均化した後、デジタル波形として収録する。サンプリング周波数は 15MHz, 計測

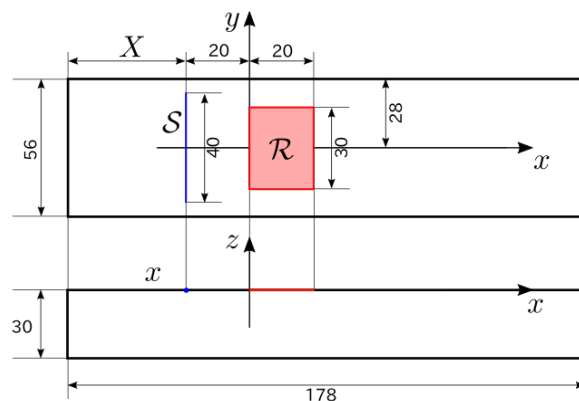


Fig. 2 The layout of the source and measurement apertures

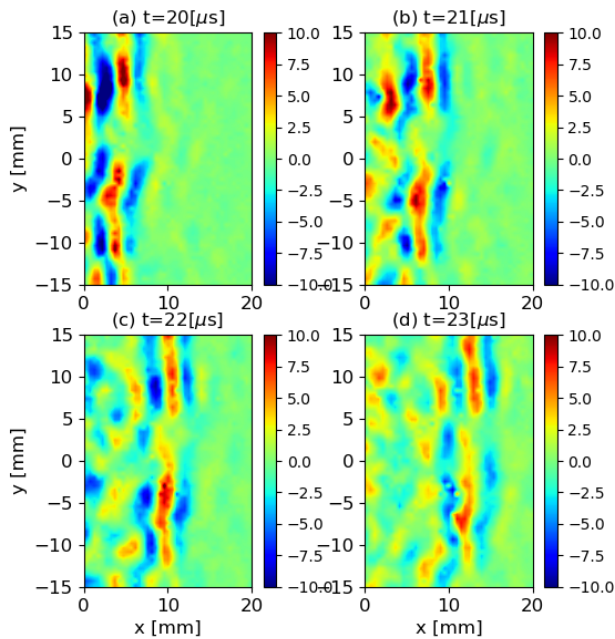


Fig.3 Snapshots of the measured ultrasonic wave field.

時間範囲は 200μ 秒とした。Fig.2 に送信および受信領域の配置を示す。図中の S で示した線は、送信センサーの接触位置を表し、この部分で試験片に鉛直動が加えられる。R は LDV でスキャンする波形観測領域を示す。スキャンピッチは x, y 方向とも 0.5mm とし、R 上で計 $41 \times 61 = 2,501$ の波形を取得した。Fig.3 に計測結果の一部を示す。この図は、時刻 $t=20 \sim 23\mu$ 秒で観測された波動場を 1μ 秒間隔のスナップショットとして示したもので、左から右へ表面波が伝播する様子が示されている。初動位置を正確に特定することは難しいが、大きな振幅を持つ波動が通過した背後の領域にも、多重散乱により振動が継続する様子が見られる。

3. 位相構造と波数ベクトル分布の評価

Fig.4 に周波数 $0.4, 0.6, 0.9$ および 1.2MHz の波形成分に対する位相の空間分布を示す。相対的に低周波の 0.4 と 0.6MHz では、等位相線(波面)が y 軸方向に伸びる 1 次元的な構造を示している。ただし、波面は屈曲して直線的ではない。一方、 0.9 および 1.2MHz では、y 方向への位相の揺らぎが大きく、平面波的な構造が見られない。Fig.5 に、位相分布の勾配を中央差分で近似して求めた、波数ベクトル $\mathbf{k}$ の確率密度分布を示す。Fig.5-(a)は、波数ベクトルの大きさ $|\mathbf{k}|$ に関する、(b)は x 軸方向から測った $\mathbf{k}$ の方向に関する確率密度を示している。(a)の図にあるように、 $|\mathbf{k}|$ の確率密度は非対称かつ有限な幅をもち、ガウス分布的でもない。また、周波数が大きくなるにつれ分散が増加している。これは、波数と周波数の関係が確定的に定められないこと、高周波になる程波動場の分散性が強まるが、波数の大きさは一定範囲に留まることを示している。また、波数ベクトルは入射方向に配向するが、相対的に高周波の 1.0MHz と 1.2MHz では配向性が低下し、伝搬経路の屈曲が強まることを示している。これら波数ベクトルの確率密度と周波数の関係を記述する法則を見出すことは今後の課題だが、花崗岩のランダム媒体としてのモデル化においては、このような波数ベクトルの特徴を反映する必要がある。

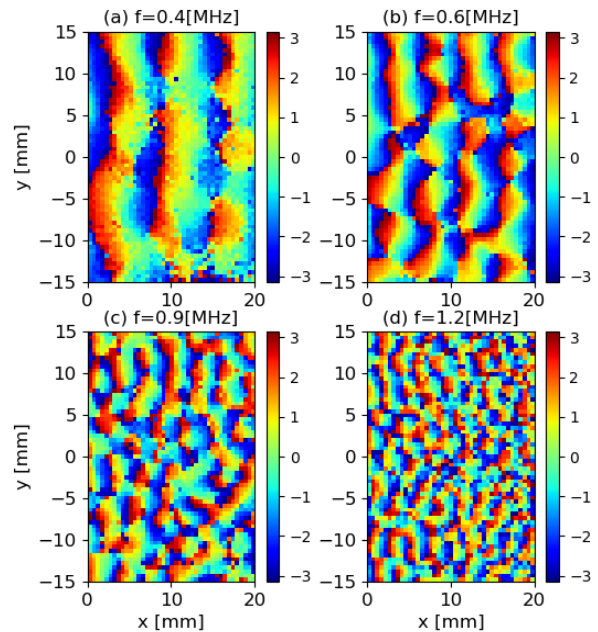


Fig. 4 Spatial variation of the phase at four different frequencies.

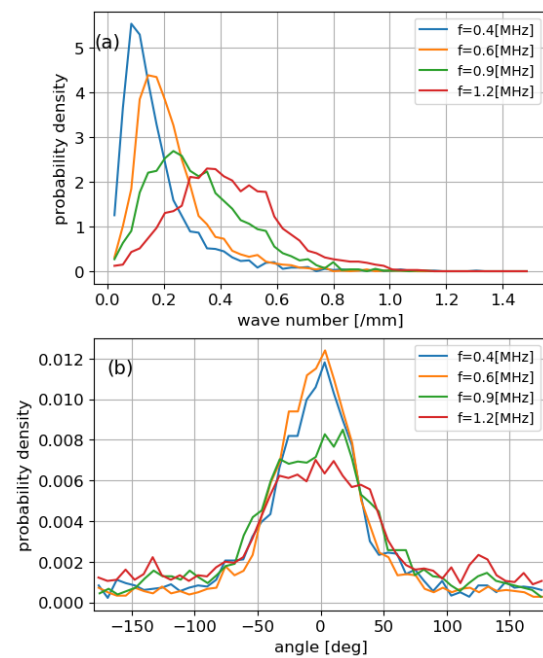


Fig.5 The probability densities of the wave number vector. (a) magnitude, (b) angle relative to the incident direction (x-axis).

4. まとめ

本研究では、花崗岩中を伝播する表面波を計測して位相の空間分布を求め、波数ベクトルの確率密度分布を推定した。その結果、媒体の不均質性によって波面が屈曲すること、波数ベクトルの確率密度分布は周波数に強く依存すること、高周波になるにつれ確率密度がブロードになること、波数は非対称かつ有限な幅の非ガウスの確率分布に従うことが明らかとなった。今後は、波数ベクトルの空間分布構造とその周波数依存性、岩石物性との関係について調べることが、工学的な応用を展開する上での課題となる。