

(59) 岩盤の異方性によるS波スプリッティングの検出
一割れ目の卓越方向推定に関する基礎実験結果一

応用地質株式会社
清水建設株式会社

○ラナジット・ゴーシュ、長田正樹
若林成樹、木下直人

**Evidence of Shear-Wave Birefringence from Shallow VSP Data
- A Robust Technique to Deduce Crack Orientation Profile-**

○Ranajit GHOSE, Masaki OSADA (OYO Corp.)
Naruki WAKABAYASHI, Naoto KINOSHITA (Shimizu Corp.)

ABSTRACT: A salient seismic feature of fracture-related rock structure is the effective shear-wave anisotropy manifested in the form of 'birefringence' or 'shear-wave splitting'. In this paper, we report the preliminary results of delineating the depth varying polarization direction of shear waves from a shallow vertical seismic profiling experiment conducted at a hard rock area. We have developed a new algorithm for estimating systematically the polarization azimuth of the split shear waves observed at a regular depth interval by a downhole three-component seismometer with fixed orientation. The technique does not assume orthogonality of the split shear waves. The processing results in clear decoupling of energy between the reception coordinates, and consequently a notable improvement in the alignment of phase arrival. The estimated polarization azimuth of the fast-split shear wave varies from northwest at shallow depths, to north to northeast below about 30m. The interpreted profile exhibits excellent correlation with that obtained by actual measurement of strike of the open cracks from borehole TV images and core samples, even in scales of a few meter.

1. はじめに

土木工学の分野では、構造物の設計に初期応力を的確に評価する必要が指摘されており（木山、1992）、種々の応力測定法が試みられている。我々は、応力あるいはそれによる亀裂の卓越方向を地震波の伝播現象を基に推定できるのではないかと考え研究を進めてきた（Ghose and Takahashi, 1991）。

近年、地球物理、地震予知あるいは石油探査の観点から、地震波異方性についての研究が非常に盛んに行われている（e.g. Leary et al., 1990; Crampin and Lovell, 1991; Winterstein and Meadows, 1991）。異方性媒質内を伝播するS波は、2つのモード（ qS_1, qS_2 ）に分裂（スプリッティング）し、しかもそれぞれに異なった速度で伝播すること、 qS_1, qS_2 の振動方向は亀裂系の巨視的な走向と密接な関係があることが知られている。またLynn(1991)は、浅部地盤においてそれらの速度比と応力との間に実験的な相関関係を見だしている。このように、地震波異方性により媒質の応力ないしは亀裂を評価できる可能性があるにも関わらず、土木工学分野では理論的・実験的な試みが少なかった。それは、地盤構造の複雑性と、異方性の程度とスケールの面で異方性の検出自体が難しかったことなどのためと考えられる。我々は、比較的均質な岩盤においてクラックが鉛直方向に整列している時、注意深いVSP測定を行うことによりS波分裂が測定されるものと考えて基礎的な実験を試みた。浅い地盤を対象にS波分裂現象をよりの確に検出できる方法を開発した。この方法により検出された qS_1 の振動方向が深度と共に変化することを見だした。これらの結果と実際に観察された亀裂系との対応関係についても触れる。

2. 実験の概要

(1) 測定方法： 測定は、非常に硬質な片麻岩が露出しているサイトに掘削されたボーリング孔（深度5.2 m）を利用して、ゼロオフセットVSP法の測定点配置で行った。SH波の起振は、ボーリング孔より1.5 m離れた2箇所に設置した板をカケヤで打撃する方法によった（図-1）。このうち1台の振源（S2）はほぼ南北方向（N5°E）、他の一方（S1）はS2と直交する方向である。打撃方向は、図-1に示す矢印方向とした。各振源にはショットマーク用の地震計を取り付けた他、2つの振源から等距離に3成分地震計（10Hz）を地表面に設置して起振波形を記録し、併せて起振時の補正に利用した。受振には、方位計付き孔内固着型3成分地震計（速度型；固有周期10Hz）を用い、深度5 mから4.9 mの区間に互り1 mピッチで測定した。測定にあたっては、水平動2成分の地震計の感度を等しく保つために、各深度において振源方向と45°をなす方向に整列させたのち、孔壁に固定した。記録の収録は、20ビット相当の解像度を持つIFPアンプでおこなった。サンプリング時間は、50 μsecである。測定の諸元を表-1に示す。

(2) 測定結果： 測定結果を図-2に示す。S1、S2振源からの波形に、50-350Hzのバンドパスフィルターをかけた上、45°回転させた記録を重ねて表示したものである。この図から、①S1振源からのSH波の見掛相速度はほぼ3.42Km/secと見なせるが、②S2振源からのSH波はS2からのものより常に遅く現れている、ことが判る。さらに、③いくつかの深度で走時が逆転している、④45°回転した後の他の水平動成分にはS波成分が大きく残っている、などのことから、SH波の振動方向は起振-受振の幾何学的な関係だけでは理解されない。以上のような観測事実は岩盤の異方性の存在を強く示唆するものと考えられた。

表-1 使用機器および設定パラメータ

孔内ゾンデ	ボアホールシャトル 回転ツール+方位計+3成分地震計 (SMC3C、10Hz)
コントロール	ボアホールシャトル170
データ収録	マックサイズ170f
サンプリング	50 μsec
記録長	100 msec
フィルタ	5~4000 Hz

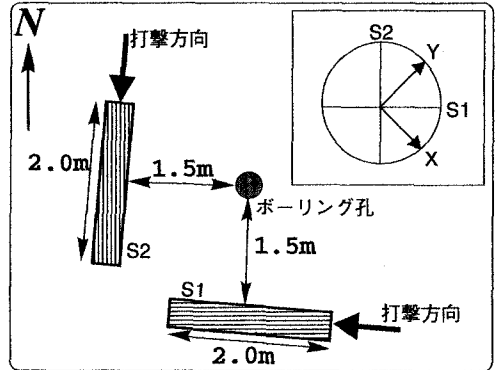


図-1 振源の設置法および孔内地震計の向き

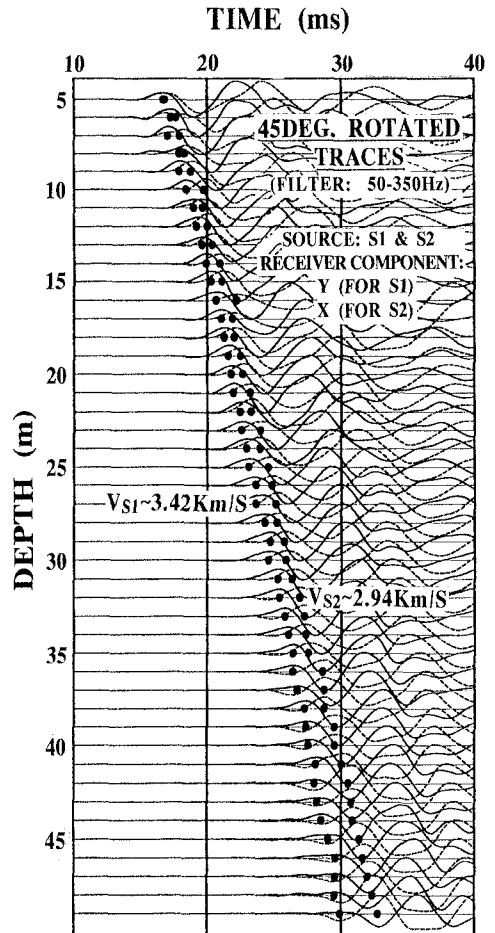


図-2 観測波形（45°回転後）

3. スプリットしたS波の振動方向の推定

(1) エネルギー最小化法： 観測される地震波動には、種々の位相が含まれているので、個々の位相の振動方向を推定するためには、着目する位相を分離する必要がある。特に今回のような極めて高周波のSH波を扱う際にはノイズ・他位相の混入等による影響を注意深く扱わねばならない。そこで我々は、図-3に示す流れに沿った解析を試みた。まず、3成分記録を使った共分散解析 (Esmersoy, 1984) を行ない入射波動場の固有ベクトルを求める。その固有ベクトルが最大になる方向での記録を合成し、それを元にSH波の到達時刻を荒目に推定する。その時刻を挟むある一定時間長のウィンドウ (ほぼ半周期相当) を原記録にかける。このウィンドウ内では、より入射SH波振動方向に近い水平動成分が大きな振幅を持つはずであるが、我々は逆にそれに直交する水平動成分のエネルギーが最小となる方向を見出すことを考えた。図-4は、直交成分のウィンドウ内のエネルギーと最小化回転角でのエネルギーの比を、回転角度の関数として示したものである。図では、最終的に推定された回転角を 0° としすべての深度についてのデータを重ねて示している。推定された振動方向は $\pm 2^\circ$ 程度で、エネルギーが10倍変化しており、決定精度は同程度であると言える。

図-5は、観測波形を処理した結果である。図-5と図-2を比較すると、位相の並びは格段に改善されている。またSH波成分が良く分離されている。

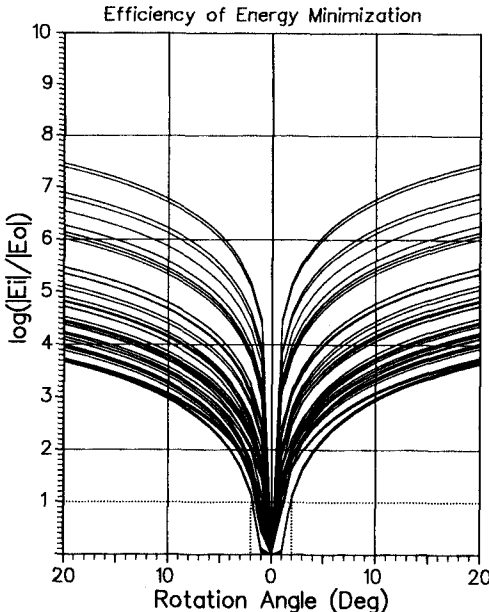


図-4 エネルギー最小化の収束状況

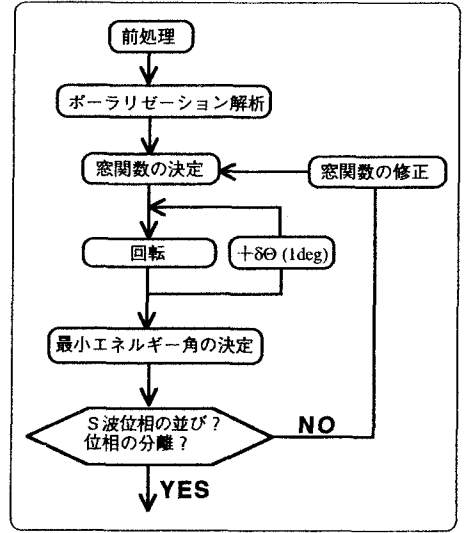


図-3 データ処理の流れ

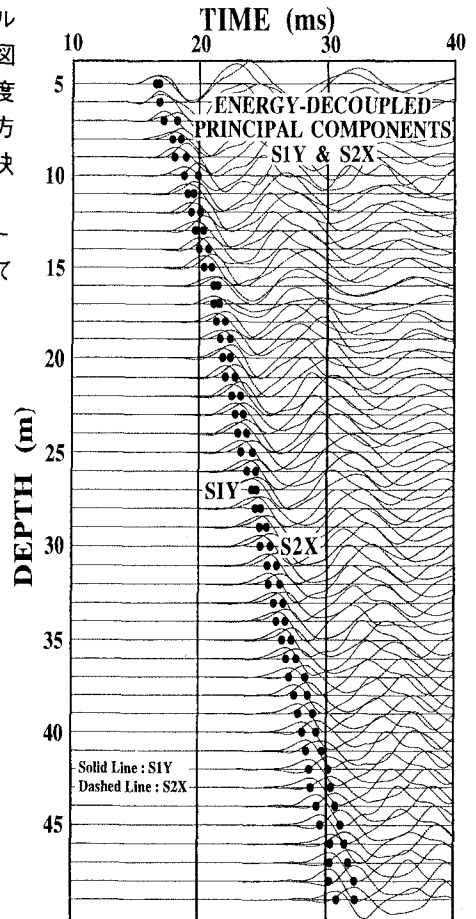


図-5 処理後の波形 (回転角は各深度で異なる。)

(2) 区間速度 (速度異方性) : 図-5に示したように、震源S1およびS2から各深度の受振器までの伝播距離は同じであるにもかかわらず、S波の伝播時間が、それぞれ異なっている。それぞれの速度比 $(Vs1-Vs2) \times 100 / Vs1$ (%) は一つの異方性パラメータを与える。ここで仮に6m区間の速度比の深度方向の変化を求めてみると、図-6のようになる。S1震源からの波は常にS2からのものより速くついているものの、特に浅い部分の一部にS2の方が速くなって、速度比が大きく逆転しているところがみられる。この逆転は、おもに遅く着いているS2の速度(走時)の決定精度が低かったためと考えられる。この点を除けば、おおよそ8~12%程度の速度異方性を持つといえる。全体的な傾向としては深度30mを境にそれよりも深い範囲では明らかにVS1が大きくなっている。このことは、図-5で、両者の初動到達時間差が開いていっていることに対応している。

(3) 振動方向 : S波の振動方向もまた、異方性を示すパラメータである。図-5に示すSH波の振動方向は、受振点深度と共に変化した(図-7; 折れ線)。S1振源(東西方向に起振)からのSH波は、ほぼ北西-南東方向の振動を、深度30m前後まで示している。S2振源からのSH波は、北東-南西方向に振動しており、その深度方向への変動パターンはS1に対するものと平行である。しかしながら、深度30mを越える範囲では、S1, S2共に南-北方向に近づいてきている。図-6, -7から、速度に関する異方性パラメータにたいし、振動方向の方が各深度毎の決定精度もよく、また深度間での連続性が良いという意味で、より安定して求めることができる異方性パラメータといえる。以上、伝播速度と振動方向についてのデータから、S1振源からファーストスプリット、S2からはスロースプリットのSH波が検出されたものと考えた。

4. 他の観測データとの対比

本実験サイトでは、実験孔についてほぼ採取率100%で回収されたコアの詳細な観察が可能であった。また、ボアホールテレビ画像も取得されている。我々は、ボアホールテレビの画像を元にコアサンプルを観察し、開口した亀裂の走向・傾斜を実測した。平均傾斜角は50~60°であった。走向は、図-7に丸印で示した。深度約30m以浅では優勢な割れ目の方向はほぼ北西-南東方向であり良く揃っている。共役な割れ目は少ない。その一方、深度30m以深では、走向が北-南ないしは北東-南西方向へと廻っている。ここでは、特に岩種・岩相に顕著な変化は見られないものの、主方向とそれに共役なクラックが共に同等の密度で出現しており、また開口面のねじれが見られる場合もあったため、データがややばらついている。

全体的にみれば、このような観察結果(丸印)は、S波の振動方向についての解析結果(折れ線)とは、非常に良く似た深度分布の傾向を示している。すなわち、開口割れ目の卓越走向にS波が分裂(スプリティング)し、その方向に振動しながら伝播していること、そして、その後に割れ目と直交する振動成分がやや遅れて伝わっていることを意味している。

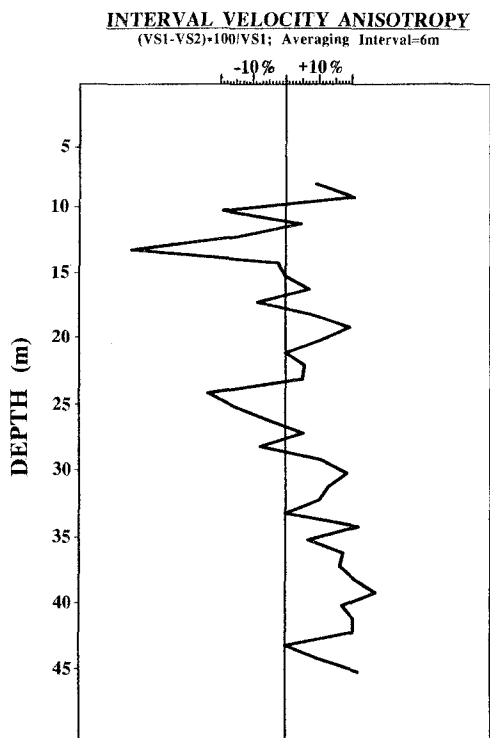


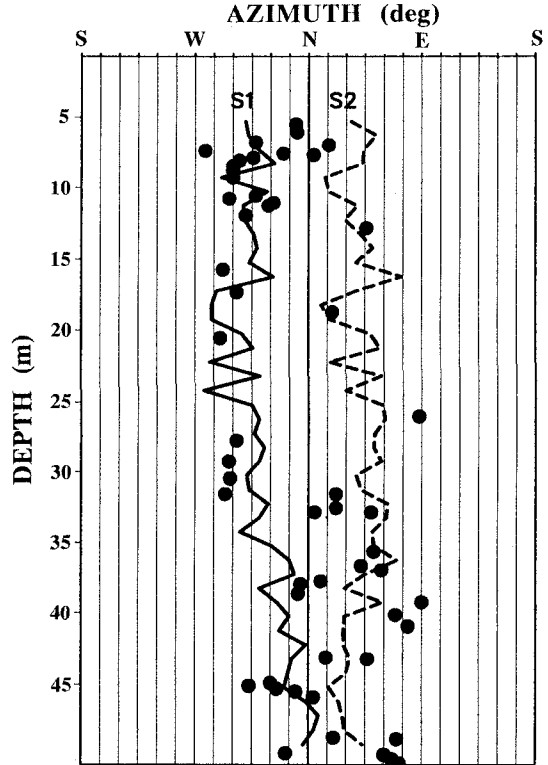
図-6 速度異方性の深度変化
(6m区間の移動平均から算出)

5. まとめ

均質な、しかし異方的な岩盤を対象に地震波異方性の検出を目的とし、SH波を使い、起振方向と受振方向を制御したゼロオフセットVSP測定実験を行なった。データの解析にあたって、実際の探査環境において適用できるように、スプリットしたS波の振動方向を精確に求める方法を提案した。この方法により推定されたファーストスプリットSH波の振動方向は、深度方向に系統的に変化することが明らかになった。その振動方向はその深度で実測された開口割れ目の卓越方向とほぼ同じ方向を示した。

今回開発した解析法は、これまでに他の分野で利用されてきた手法とは異なり、より伝播距離の短い、高周波の波動場に対し、スプリットした位相同士の直交関係を仮定せずに適用できるものである。さらに浅部探査では良くみられる様に種々の位相が混在している状況のもとで、位相を分離する効果的な手法である。

この実験結果は、初期応力状態に規定された亀裂系の深度方向での変化を、SH波の振動方向の変化として捉えることが土木的なスケールでも可能であることを強く示唆している。また、今回試みた方法は、方法論的にも岩盤内の速度情報と亀裂系に関する情報を同時に取得できる方法として利用できる可能性があるものと考えられる。今後、同様なデータを蓄積して行き、本手法の適用性を確かめて行きたい。



*S1 and S2 Polarization Azimuths : Mutually Independent Solutions.

図-7 S波振動方向の深度分布（折れ線）
および実測された開口割れ目の走向（丸印）

References:

- Crampin, S. and J.H. Lovell, 1991: A decade of shear-wave splitting in the Earth's crust: what does it mean? what use can we make of it? and what should we do next?, *Geophys. J. Int.*, **107**, 387-407.
- Esmersoy, C., 1984: Polarization analysis, rotation and velocity estimation in three-component VSP, in Toksöz and Stewart (eds.) "Vertical Seismic Profiling", Geophysical Press.
- Ghose, R. and T. Takahashi, 1991: Multiazimuthal seismic reception in borehole; Implication on field detection of seismic anisotropy, SEG 61st Annual Intl. Mtg., Houston.
- 木山英郎, 1992: 初期地圧測定を設計・施工に活かすには一適用例と測定法への要望一, 第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集。
- Leary, P.C., S. Crampin and T.V. McEvelly, 1990: Seismic fracture anisotropy in the earth's crust; An overview, *J. Geophys. Res.*, **95**.
- Lynn, H.B., 1991: Field measurements of azimuthal anisotropy: First 60 meters, San Francisco Bay Area, CA, and estimation of horizontal stresses' ratio from V_{s1}/V_{s2} , *Geophysics*, **56**.
- Winterstein, D.F. and M.A. Meadows, 1991: Shear-wave polarizations and subsurface stress directions at Lost Hills field, *Geophysics*, **56**.