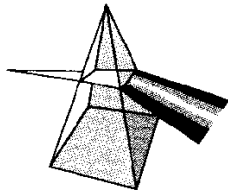


【技術報告】



花崗岩中の透水性割れ目検出を目的とした ハイドロフォンVSP調査法の適用性研究

藪内 聡

東濃地科学センター

資料番号：2-1

Hydrophone VSP Experiment for Detecting Permeable
Fractures in Granitic Rock

Satoshi YABUUCHI
Tono Geoscience Center

地表から掘削された試錐孔を用いて花崗岩中の透水性割れ目を検出し、その3次元的な広がりや透水性に関する情報が得られる可能性のあるハイドロフォンVSP調査法の適用試験を、工業技術院地質調査所との共同研究として実施した。さらに、BTV（ボアホールテレビ）データや水理試験結果等と対比することにより、本適用試験で得られた調査結果の信頼性について検討した。

その結果、試錐孔と交差する透水性割れ目の位置及びおよその透水係数を把握する上で、ハイドロフォンVSP調査が有効であることが確認できた。

Hydrophone VSP (Vertical Seismic Profiling) experiment was carried out for detecting permeable fractures in granitic rock, and for estimating spatial extent and permeability of these detected fractures, in cooperation with Geological Survey of Japan. We compared the results of the hydrophone VSP experiment with BTV data, hydraulic test and other investigations.

Hydrophone VSP is useful to detect permeable fractures and to estimate an approximate hydraulic conductivity of a single open fracture.

キーワード

VSP調査、震源、チューブ波、マルチオフセットデータ解析、透水性割れ目、走向、傾斜角、透水係数
VSP, Seismic Source, Tube Wave, Multi-offset Data Analysis, Permeable Fracture, Dip, Strike, Hydraulic Conductivity

1. はじめに

東濃地科学センターでは、地質環境が本来有している地質学的、水理学的、地球化学的性質の把握を目的とした地層科学研究を行っている。この一環として、地下水の流動と地球化学的性質の把握と、それに必要な調査・解析技術開発のために、「広域地下水流動研究」を岐阜県の東濃地域において進めている。

地下深部における地下水の流動を把握するためには、水理地質構造モデルを構築して、地下水流動解析を実施することが必要である。その際、地下水の流動経路となり得る割れ目や破碎帯に着目する。そして、これらの規模や広がりといった構造並びに透水性などの水理学的性質を把握することが重要となる。

ハイドロフォンVSP（Vertical Seismic Profiling）調査法は、地表から掘削された試錐孔を用いて花崗岩等の結晶質岩中の透水性割れ目を検出し、その3次元的な広がりや透水性に関する情報が得られる可能性がある。国内においては、通商産業省工業技術院地質調査所（以下地質調査所）等で透水性割れ目の評価を目的として、本調査法の適用性の研究が行われている^{1)~4)}。

東濃地科学センターでは、東濃地域の土岐花崗岩において、透水性割れ目に関する調査手法としての適用性を把握するために、ハイドロフォンVSP調査法の適用試験を実施した。加えて、本調査法で求められた透水性割れ目の広がりや透水性に関する推定値の検証を行った。なお、

この適用試験は地質調査所との共同研究として実施した。

本稿では、まず、ハイドロフォンVSP調査法(データの取得方法と解析方法)について説明する。次に、実施した適用試験の概要を述べ、最後に本調査法の適用性について検討した結果を報告する。

2. ハイドロフォンVSP調査法について

2.1 調査原理

ハイドロフォンVSP調査では、地表付近に配置した人工震源と試錐孔内に配置するハイドロフォンと呼ばれる受振器を用いる。そして、震源から発生したP波(P波とは地球内部を伝わる地震波の一つ)と、それに起因するチューブ波と呼ばれる波を観測する⁵⁾。

人工震源から発生したP波が岩盤内部の透水性割れ目に入射すると、それを圧縮する力が作用する。そして、割れ目内部の地下水が試錐孔内に押し出されることによりチューブ波が励起される。チューブ波とは、孔内水で満たされた試錐孔の内部を孔軸方向に伝わる波である。ハイドロフォンVSP調査では、試錐孔に沿って上方及び下方に伝わるチューブ波をハイドロフォンで観測する。図1にハイドロフォンVSP調査の概念図を、図2に観測されたチューブ波の波形データの一例を示す。

なお、ハイドロフォンVSP調査法について、これまでに行われている研究に関しては地質調査所の報告等を参照されたい^{1)~3)}。

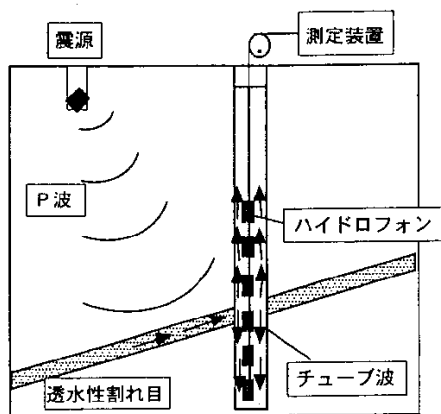


図1 ハイドロフォンVSP調査の概念図
(チューブ波が透水性割れ目から発生する様子を模式的に示す)

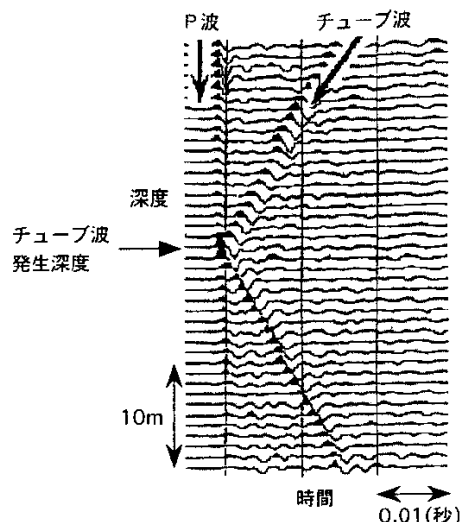


図2 チューブ波波形データの一例
(図のチューブ波発生深度においてチューブ波が発生し、上方及び下方に伝わっている)

2.2 データ解析

2.1で述べたように、ハイドロフォンVSP調査は、観測されるP波並びにチューブ波の波形データを利用するものである。

(1) 透水性割れ目の検出(試錐孔と交差する深度の決定)

ハイドロフォンVSP調査では、図2に示したようなP波並びにチューブ波が観測される。P波とチューブ波が重なっている深度がチューブ波の発生深度である。これを、透水性割れ目が存在する深度と考える。

必要に応じて、チューブ波発生深度を読み取りやすくするためのデータ処理(フィルタリング)を行う。しかし、複雑な処理は特に必要としない。

(2) 透水性割れ目の透水係数の推定

ここでは、Beydounらの方法⁹⁾による平行平板の割れ目モデルを適用した透水係数の求め方を示す。

Beydounらの基本的な考え方は、チューブ波とそれを発生させたP波の振幅比を求め、その振幅比を割れ目の透水係数と関係づけることである。チューブ波とP波の振幅比、P波の周波数及び割れ目の透水係数の関係を表す理論式は(1)式のように書くことができる⁹⁾。

$$P^T/P^P = C(k, f) \times D(\psi, f) \times \cos \theta \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

P^T/P^P : チューブ波とP波の振幅比

k : 割れ目の透水係数

f : P波の周波数

ϕ : 入射P波と試錐孔軸とのなす角度

θ : 入射P波と割れ目面の法線とのなす角度

$C(k, f)$: チューブ波の圧力に関する関数

$D(\phi, f)$: 入射P波の圧力に関する関数

である。

関数 $C(k, f)$ と $D(\phi, f)$ には、岩盤内部のP波及びS波速度、チューブ波の速度、試錐孔の半径、孔内水の圧縮率と粘性係数がパラメータとして代入される。

この理論式から、チューブ波とP波の振幅比とP波の周波数並びに割れ目の透水係数に関する理論曲線を描くことができる。図3に理論曲線の一例を示す⁷⁾。

割れ目の透水係数を求めるために、まず、チューブ波発生深度にある割れ目の傾斜角をBTV（ボアホールテレビ）等のデータから決定して、上述の理論曲線を得る。BTVとは、テレビカメラを試錐孔内に降ろして試錐孔孔壁の状態を観察する検層の一種である。孔壁の画像から、孔壁に認められた平板状の割れ目の走向、傾斜角及び開口幅を求めることができる。次に、ハイドロフォンVSPデータから、チューブ波とP波の振幅比を各周波数について計算する。最後に、それを理論曲線上にプロットして透水係数を推定する。

ただし、この方法ではチューブ波を発生させた割れ目の傾斜角を、BTV等のデータから別途知る必要がある。つまり、ハイドロフォンVSP調査だけでは割れ目の透水係数は推定できないことを意味する。ハイドロフォンVSPデータのみを用いて割れ目の走向及び傾斜角を推定するためには、マ

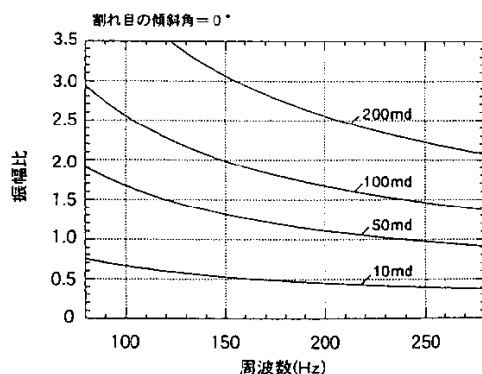


図3 チューブ波とP波の振幅比(縦軸)、周波数(横軸)及び透水係数の関係を示す理論曲線の一例(割れ目の傾斜角を 0° とし、透水係数として10ミリダルシーから200ミリダルシーを与えた理論曲線)

ルチオフセットハイドロフォンVSP調査を実施する。これは、震源を異なる3カ所以上の位置に配置してハイドロフォンVSPデータを取得する調査法である。次の節では、マルチオフセットハイドロフォンVSPデータの解析方法を説明する。

(3) 透水性割れ目の走向、傾斜角の推定

3カ所の震源を用いて取得したマルチオフセットハイドロフォンVSPデータの場合、(1)式は(2)式のように書くことができる⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} (P^T/P^P)_1 \\ (P^T/P^P)_2 \\ (P^T/P^P)_3 \end{bmatrix} = C(k, f) \times \begin{bmatrix} D(\phi_1, f) & 0 & 0 \\ 0 & D(\phi_2, f) & 0 \\ 0 & 0 & D(\phi_3, f) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_{x,1} & p_{y,1} & p_{z,1} \\ p_{x,2} & p_{y,2} & p_{z,2} \\ p_{x,3} & p_{y,3} & p_{z,3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

$(P^T/P^P)_i$: 震源が i ($i=1, 2, 3$) のデータから求めたチューブ波とP波の振幅比

$(p_{x,i} \ p_{y,i} \ p_{z,i})$: 震源が i ($i=1, 2, 3$) のときの試錐孔に入射するP波のベクトル成分

(n_x, n_y, n_z) : 割れ目面の単位法線ベクトル成分

$C(k, f)$: チューブ波の圧力に関する関数

$D(\phi, f)$: 震源が i ($i=1, 2, 3$) のときの入射P波の圧力に関する関数

ϕ_i : 震源が i ($i=1, 2, 3$) のときの入射P波と試錐孔軸とのなす角度

である。

(2)式を (n_x, n_y, n_z) について解くと、割れ目面が一つに決定されるため、割れ目の走向及び傾斜角を求めることができる。

今回の適用試験のように震源が4カ所以上ある場合には、例えば最小二乗法などを用いて (n_x, n_y, n_z) を決定する。

3. 東濃地域におけるマルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の適用試験

3.1 データ取得作業概要

平成6年度と平成7年度の2回にわたり、東濃地域の十岐花崗岩中に掘削された試錐孔(AN-1号孔)を観測孔とし、震源を複数箇所に配置し

たマルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の適用試験を実施した^{8,9)}。

観測孔に設置するハイドロフォンの間隔は1 mである。また、ハイドロフォンの設置深度（データ取得深度）は20 m～609 mである。震源は火薬を用いる火薬震源と、それと比較して取り扱いの容易な機械式震源の2種類を採用した。

火薬震源は、震源用の試錐孔を掘削し、試錐孔内部（地下水中）で火薬を発破させるものである。発生させるP波のエネルギーが大きく、高周波成分を多く含んでいるため質の高いデータが得られる。その反面、発破用の試錐孔を掘削する必要があるため費用がかかるとともに、震源位置（震源用の試錐孔の掘削位置）に制約を受ける。

一方、今回使用した機械式震源は、400kgの重錘を高さ3 mから地表に自由落下させることにより、P波を地中に発生させるものである。この震源装置は車積型で自走できるため、震源位置を自由に変えることができる。また、火薬を使用しないため取り扱いも簡便である。しかし、一般的に火薬震源と比較して取得されるデータの質は劣るため、ハイドロフォンVSP調査に適用できるかどうかは検証する必要がある。

そこで、今回の適用試験では、2種類の震源により取得されるデータから読み取れるチューブ波発生深度を対比することにより機械式震源の適用性についても検討した。機械式震源が適用可能であると、ハイドロフォンVSP調査をより簡便に実施できると考えられるためである。

図4に震源の配置図を示す。図中において、SHの頭文字は火薬震源を、WDの頭文字は機械式震源を示す。

データ取得に使用した機材について以下に記す。

- (1) 震源
 - 1) 火薬震源
 - ・ 深海用電気雷管
 - ・ 深海用桐ダイナマイト
 - ・ 発破器
 - 2) 機械式震源
 - ・ オートハンマーWAH3400型
- (2) ハイドロフォン
 - ・ ハイドロフォンP-27-12C
 - ・ 電動ウィンチ（ケーブル長1,000m）
- (3) データ収録装置
 - ・ 探鉱器
- (4) その他
 - ・ 地上地震計（発震波形を参照するため地上でP波を受振する）

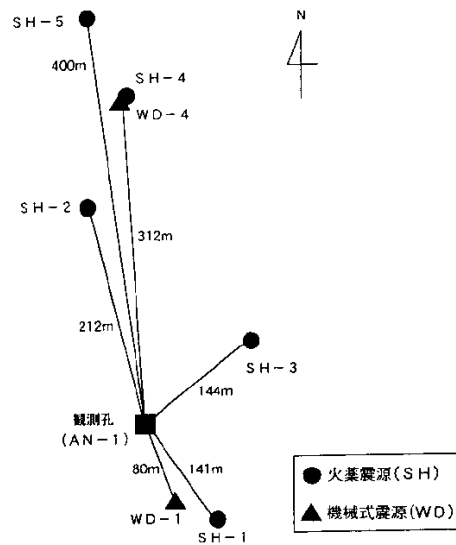


図4 震源配置図

3.2 火薬震源と機械式震源によるデータの比較

図5にそれぞれの震源を用いて取得した波形データの例を示す。データの質（周波数及び振幅）を比較するため、ほぼ同じ位置にある火薬震源SH-4と機械式震源WD-4（図4参照）のデータ（受振深度509 m）を対比した。火薬震源によるデータの中心周波数は約200Hzであるのに対し、機械式震源のそれは約50Hzであった。また、火薬震源によるデータの振幅は機械式震源の約2.5倍であった^{9), 10)}。

振幅が小さいとチューブ波を読み取れない可能性が大きくなり、周波数が低いとチューブ波発生深度の読み取り誤差が生じやすい。そこで、機械式震源のデータに対し、チューブ波発生深度を読み取りやすくするためのデータ処理を行ってからチューブ波発生深度を読み取った。具体的には、

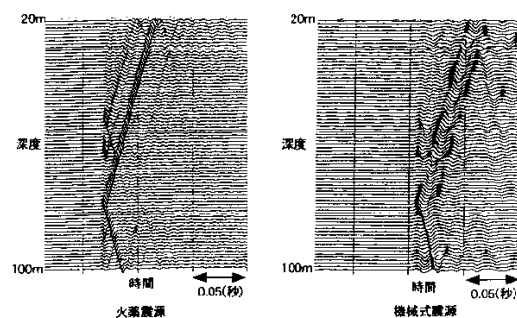


図5 火薬震源及び機械式震源によるハイドロフォンVSPデータの比較

表1 チューブ波発生深度

火薬震源 (SH-4) 測定深度20~609m	機械式震源 (WD-4) 測定深度20~509m
39	39
52	52
61	62
79	79
103	103
121	121
123	123
130	—
164	164
168	—
219	219
224	223
254	253
264	264
270	270
297	296
305	304
313	—
467	—
470	469
478	478
492	492
531	—
552	—

単位 (m)

同じ条件で取得された波形データを足し合わせるスタッキングや特定の周波数成分を強調するフィルタリングといったデータ処理である。表1に火薬震源SH-4と機械式震源WD-4のデータから読み取ったチューブ波発生深度を示す。

表1から調査深度が500m程度ならば、機械式震源によるデータでも火薬震源と同程度にチューブ波発生深度を求めることができる。ただし、2.2の(3)に述べた解析を行うには、複数の周波数についてチューブ波とP波の振幅を読み取って振幅比を求めるため、質のよい火薬震源によるデータが望ましい。

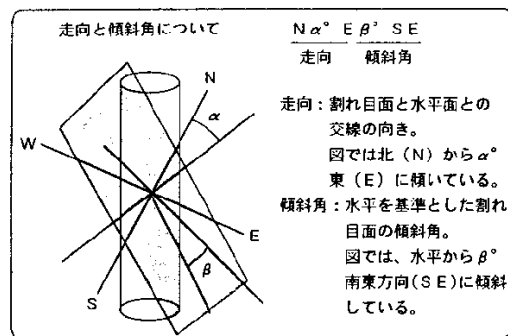
3.3 透水性割れ目の走向、傾斜角、透水係数の推定

取得したすべてのデータについて、チューブ波発生深度を求めたところ、必ずしもすべての震源のデータに共通して同じ深度にチューブ波が認められたわけではなかった。チューブ波の発生が一部の震源のデータのみで確認される原因として、Beydounら⁹⁾によるチューブ波発生モデルによれば、入射P波と割れ目面の法線方向のなす角度が90°に近くなるとチューブ波を励起するエネルギーが小さくなることが考えられる。

今回の適用試験において、少なくとも一つの震源のデータからチューブ波が認められた箇所は、測定深度20~609mの内39カ所であった。この39カ所の深度について観測孔のAN-1号孔のBTVデー

表2 マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析結果

番号	透水性割れ目の抽出深度 (m)	走向・傾斜角	透水係数 (cm/sec)
1	52	N33° W24° NE	2.0E-4~1.5E-3
2	61	N52° W3° SE	5.0E-5~5.0E-4
3	79	N39° W3° SW	2.0E-4~8.0E-4
4	103	N50° W33° SW	1.0E-5~6.0E-5
5	121	N71° W56° SW	5.0E-6~6.0E-5
6	123	N54° W4° SW	2.0E-5~2.0E-4
7	164	N27° W60° SW	2.0E-4~1.5E-3
8	219-224		
	219	N11° E89° SE	1.0E-5~2.0E-4
	224	N1° E82° NW	3.0E-4~1.5E-3
	264-270		
9	264	N16° E88° NW	1.0E-4~4.0E-4
	270	N13° W59° SW	5.0E-5~1.0E-3
10	297	N17° W65° SW	1.0E-4~2.0E-3
11	305	NS78° W	1.0E-4~1.5E-3
12	467-469		
	467	N12° E87° NW	5.0E-5~5.0E-4
13	478	N37° W22° SW	3.0E-5~2.0E-4
14	492	N2° E83° NW	2.0E-4~1.2E-3
15	549	N83° E24° NW	1.0E-5~5.0E-5



タを参照したところ、すべての深度において割れ目が認められた。したがって、チューブ波の発生深度には透水性割れ目が存在するものと考えられる。

ハイドロフォンVSPデータから透水性割れ目の走向、傾斜、透水係数を推定するには、2.2の(3)で説明したマルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析を実施する。このためには、3カ所以上の震源のデータに関して、同じ深度にチューブ波が認められなければならない。今回は、3カ所以上の火薬震源のデータで同一深度にチューブ波が発生している15カ所について、マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析を実施した。求められた透水性割れ目の走向、傾斜角、透水係数を表2に示す⁹⁾。表中でチューブ波発生深度が2m以上の区間で示してあるものは、その区間全体からチューブ波が発生している可能性がある。この場合は、区間の上端あるいは下端に認められるチューブ波を用いて解析を行った。

4. 考察

マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解

析により求められた透水性割れ目の走向、傾斜角、透水係数について検討した内容を述べる。

4.1 観測孔のBTVデータとの対比

試錐孔孔壁における割れ目の状態（外観）が推察できるBTVデータとチューブ波発生深度との対比を実施した。

全体的な傾向として、チューブ波が発生している深度では、おおむね開口幅の大きな割れ目が明瞭に認められる。しかしながら、開口幅の小さい割れ目しか存在しない箇所でもチューブ波が認められた場合がある。また、チューブ波が発生していない深度に開口割れ目が存在する場合もある。前者は、試錐孔の孔壁で認められる割れ目の開口幅の大小が、必ずしもその割れ目の透水性の大小を示すわけではないことを表していると考えられる。後者は、ハイドロフォンVSP調査により検出される透水性割れ目（チューブ波を発生させる割れ目）とBTVデータで認められる開口割れ目が、場合によっては異なる可能性があることを意味するものと考えられる。

これは、1 m間隔のチューブ波を対象としているハイドロフォンVSP調査と、最も細かいところで1 cm程度の間隔で割れ目が抽出されているBTVデータの分解能の違いに起因するものと考えられる。また、孔壁近傍の局所的な情報であるBTVデータに対して、ハイドロフォンVSP調査では孔壁から広がりをもつ割れ目の情報を含んでいることが推定され、その違いが反映されている可能性も考えられる。

4.2 走向、傾斜の推定値の検討

3.3でも述べたように、チューブ波が確認されたすべての深度においてBTVデータでは割れ目が認められている。ただし、多くの深度でハイドロフォンの設置間隔である1 mの範囲内に多数の割れ目が存在している。したがって、チューブ波発生深度において、チューブ波を発生させたと考えられる割れ目を一つに特定できない場合がほとんどであった。今回の場合、BTVデータからチューブ波を発生させたと考えられる単一の割れ目が特定できたのは深度297mの割れ目1カ所であった⁸⁾。ここでいう単一割れ目とは、ハイドロフォンの設置深度の上下50cmを含めた1 mの範囲内に、平板状の割れ目が一つだけ存在することを意味する。

そこで、深度297mの単一割れ目及び1 mの範囲内に複数の割れ目が存在する箇所について、マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析に

表3 マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析及びBTVデータによる深度297mの割れ目の走向、傾斜角

	走向、傾斜角
ハイドロフォンVSP	N17° W65° SW
BTVデータ	N21° W63° SW

より求められた走向と傾斜角をBTVデータとの対比により検討した。

単一割れ目からチューブ波が発生する場合は、平行平板割れ目モデルというデータ解析の前提条件に合致している。一方、複数の割れ目の場合は、それらの割れ目のすべてからチューブ波が発生している可能性もあれば、一部の割れ目からチューブ波が発生している可能性も考えられる。いずれにしても、走向、傾斜、透水係数がそれぞれ異なる可能性のある複数の割れ目から生じた個々のチューブ波が合成された波が観測されるチューブ波である。そして、これを一つの平行平板割れ目モデルから生じたチューブ波とみなして解析している。

深度297mの単一割れ目の走向及び傾斜角の推定値は、BTVデータの値とほぼ一致している（表3）。一方、複数の割れ目の場合であるが、複数の透水性割れ目の走向及び傾斜角を平均した値が求められたと思われる結果も得られたが、必ずしもこのような傾向を示すわけではなく、特に相関が認められない結果も得られた¹¹⁾。前者は、上述したような合成されたチューブ波の解析の妥当性を支持するものであると考えられる。一方、後者はこの解析手法により複数の透水性割れ目の平均的な特性が求まるという考え方が当てはまらないような箇所（割れ目の状態）であることが考えられる。

4.3 水理試験結果との比較による推定値（透水係数）の検討

ハイドロフォンVSP調査により求められた割れ目の透水係数の妥当性に関して幾つかの報告がなされている^{1), 3), 4)}。しかし、原位置透水試験結果と直接対比しているわけではない。そこで、単一割れ目を対象として原位置透水試験を含む水理試験を実施し、結果を対比することによりハイドロフォンVSPデータ解析より求められた透水係数の信頼性について検討した¹²⁾。水理試験の対象とした割れ目は、上述の深度297mの割れ目と、チューブ波が認められなかった深度248mの単一割れ目である。なお、水理試験に使用した装置は、東濃地科学センター所有の1,000m対応水理試験装

表4 水理試験とハイドロフォンVSPデータ解析により求められた透水係数

水理試験区間 (区間長2.5m)	水理試験による透水係数	ハイドロフォンVSPデータ 解析による透水係数
296.84~299.34m	$1.54 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	$1.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$
246.13~248.63m	$6.00 \times 10^{-3} \text{ cm/sec以下}$	チューブ波認められず

置である。

水理試験とハイドロフォンVSPデータ解析から求められた透水係数を表4に示す。表4において、深度297mの単一割れ目では両者の透水係数に3～4オーダー程度の差異が認められる。今回の水理試験は、地下水の水位あるいは圧力に変化を与え元の平衡状態に戻る時間を計測する直接的な方法であり、正確な透水係数が求められている。ただし、求められた透水係数は試験区間(2.5m)全体の平均的な透水性を表す値である。一方、ハイドロフォンVSPデータ解析では、割れ目部分(平行平板割れ目モデル)のみの透水性を考慮し、健岩部分の透水性は考慮していない。そこで、2.5mの水理試験区間について単一割れ目を想定した水平3層モデルとみなし、水理試験結果から単位断面積あたりの流量を考えて割れ目の透水係数を算出した(図6)。その結果、ハイドロフォンVSPデータ解析による推定値とほぼ同程度の透水係数が得られた^{11), 12)}。このことから、ハイドロフォンVSPデータ解析による透水係数は単一割れ目自体の透水性を示していると考えられる。

また、表4からチューブ波が認められなかった区間の透水係数は、チューブ波が認められた区間の透水係数と比較して3オーダー程度小さい。これは、ハイドロフォンVSP調査において、透水性の観点からの割れ目の検出限界を示唆していると考えられる。

4.4 シングルホールレーダー調査結果との比較

4.1で述べたように、BTVデータは試錐孔孔壁における局所的な情報である。また、BTVで認め

られたすべての割れ目が試錐孔孔壁から離れたところまで広がっているとは言えない。

一方、ハイドロフォンVSPデータ解析により求められる値は、チューブ波の波長を考慮すると試錐孔孔壁より数m以上の広がりを有する割れ目の情報を含んでいると推定される。そこで、ある程度の広がりを有する透水性割れ目を対象として、マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析により求められた走向と傾斜角を検証できる可能性のあるシングルホールレーダー調査を実施し、走向と傾斜角について対比を試みた¹⁴⁾。

シングルホールレーダー調査は、透水性割れ目等周辺岩盤と比べて誘電率が異なる地質構造要素を電磁波の反射面として抽出するものである。抽出された反射面は、その走向と傾斜角が求められるのでハイドロフォンVSPデータ解析結果との対比が可能である。ただし、試錐孔に直交する反射面の抽出は困難である。また、透水性割れ目であっても、誘電率の変化が小さければ電磁波の反射は起こらないため検出できない可能性がある。逆に透水性割れ目以外の地質構造要素でも電磁波の反射は起こりえる。したがって、この対比には多少の不確かさが考えられる。

マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析を実施した15カ所の透水性割れ目のうち、シングルホールレーダー調査結果との対比が可能であったのは8カ所である(表5)。

深度297mの単一割れ目に関しては、走向はほぼ一致しているが、傾斜に関しては両者の間に30°程度のずれが認められる。その他の深度は、BTVデータにおいて複数の割れ目が認められる箇所であるが、それぞれの調査で求められた走向及び傾斜に関してずれが認められる。結果として、シングルホールレーダー調査結果との対比という方法では、マルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析により求められた透水性割れ目の走向と傾斜角の信頼性を十分に検討することはできなかった。

5. おわりに

花崗岩中の透水性割れ目の検出及び検出された透水性割れ目の走向、傾斜、透水係数の信頼性という観点から検討したハイドロフォンVSP調査法の適用性を以下にまとめる。

- ① 火薬震源と地表から掘削された試錐孔を利用したハイドロフォンVSP調査により、試錐孔と交差する透水性割れ目や割れ目帯を検出することが可能である。

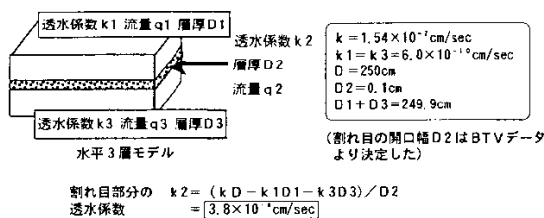


図6 水理試験から得られた透水係数の換算

表5 シングルホールレーダー調査結果とマルチオフセットハイドロフォンVSPデータ解析結果

シングルホールレーダー調査結果				マルチオフセットハイドロフォン VSP解析結果		両者の深度・走向・傾斜のずれ		
深度 (m)	走向・傾斜	反射面の連続長 (m)		深度 (m)	走向・傾斜	深度 (m)	走向 (°)	傾斜 (°)
		下向き	上向き					
52.0	N50° E58° NW		8.7	52	N33° W24° NE	0.0	88	34
102.6	N-S35° E		9.9	103	N50° W30° SW	-0.4	50	2
162.0	N50° E65° NW		16.9	164	N27° W60° SW	-2.0	77	5
223.6	E-W63° N	24.1	18.9	224	N1° E82° NW	-0.4	89	-19
263.3	N30° E71° SE	59.0	28.3	264	N16° E88° NW	-0.7	14	-17
297.3	N20° W34° NE		6.5	297	N17° W65° SW	0.3	-3	-31
468.6	N30° E60° SE		14.0	467	N12° E87° NW	1.6	18	-27
548.9	N60° E73° NW	38.3		549	N83° E24° NW	-0.1	-23	49

- ② 調査深度が500m程度までならば、重錘落下方式の機械式震源を用いても透水性割れ目を検出できる見込みがある。
- ③ 震源を異なる3カ所以上に配置してデータを取得するマルチオフセットハイドロフォンVSP調査により求められた今回の観測孔の深度297mに存在する単一の透水性割れ目の走向、傾斜角及び透水係数はおおむね信頼できる値であると考えられる。
- ④ ハイドロフォンの間隔に相当する区間内に複数の割れ目が存在する場合には、平行平板割れ目モデルによるデータ解析によって推定された走向や傾斜角の信頼性をBTVデータやシングルホールレーダー調査結果との対比によって検証することは困難である。
- ⑤ 水理試験（原位置透水試験）で 6.0×10^{-10} cm/sec以下の透水性を有する区間に存在する割れ目から解析に利用できるチューブ波は検出されなかった。したがって、岩盤の透水性に大きく寄与しないと思われる割れ目を透水性割れ目として抽出する可能性は少ないと考えられる。
- ⑥ 以上のことより、推定される透水性割れ目の走向、傾斜及び透水係数の信頼性から判断して、現状のハイドロフォンVSP調査法は割れ目頻度の比較的小さい岩盤に適していると考えられる。

今後は、ハイドロフォンVSP調査や考察において取り上げた調査に加え、フローメーター検層やクロスホール調査（ジオトモグラフィー調査）との組み合わせを検討して、透水性割れ目を検出（深度、規模、広がり及び透水性の把握）するための体系化された調査技術の確立を図る。

なお、本稿の執筆に当たっては、地質調査所の

伊藤久男主任研究官、木口努主任研究官から多くの有益な助言を頂いた。ここに、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 木口 努, 伊藤久男 他: "ハイドロフォンVSPによる透水性亀裂の検出と透水係数の評価", 物理探査, vol.49, p.285-296, (1996).
- 2) Kiguchi, T., Ito, H. et al.: "Evaluation of permeable fractures by multi-offset hydrophone VSP", *Geotherm. Sci. & Tech.*, No.5, p.21-29, (1995).
- 3) 木口 努, 伊藤久男 他: "マルチオフセットハイドロフォンVSPによる透水性亀裂の評価", 地質調査所報告, No.282, p.205-225, (1995).
- 4) 木口 努, 伊藤久男 他: "ハイドロフォンVSPによる野島断層の透水性評価", 物理探査学会第94回学術講演会講演論文集, p.44-47, (1996).
- 5) 藪内 聡, 長谷川 健: "ハイドロフォンVSP調査, 地層処分研究開発の現状 (平成8年度)", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN1410 96-071, p.282-283, (1996).
- 6) Beydoun, W.B. et al.: "Detection of open fractures with vertical seismic profiling", *Journal of Geophysical Research*, vol.90, p.4557-4566, (1985).
- 7) Hardin, E.L. et al.: "Fracture characterization by means of attenuation and generation of tube waves in fractured crystalline rock at Mirror Lake, New Hampshire", *Journal of Geophysical Research*, vol.92, p.7989-8006, (1987).
- 8) 木口 努, 藪内 聡 他: "マルチオフセットハイドロフォンVSP調査法の亀裂性岩盤への適用試験 (その2)", 地質調査所/動力炉・核燃料開発事業団 共同研究報告書, PNC TV7651 97-001, (1997).
- 9) Kiguchi et al.: "Detection of permeable fractures in granitic rock by hydrophone VSP - case study for the granitic rock, Gifu Prefecture, Japan -", 3rd SEGJ/SEG International Symposium, Proceedings, pp.64-171, (1995).
- 10) 藪内 聡, 長谷川 健: "ハイドロフォンVSP調査における機械式震源の適用性, 平成7年度地層科学研究成果報告会一要旨集一", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 96-037, p.42-45, (1996).
- 11) 藪内 聡, 長谷川 健: "ハイドロフォンVSP調査法による透水性割れ目の走向・傾斜・透水係数の検討, 平成8年度技術開発課年報", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7440 97-003, p.202-208, (1997).
- 12) 藪内 聡, 小出 馨: "ハイドロフォンVSP調査法の評価のための水理試験", 動力炉・核燃料開発事業団, PNC TN7410 97-041, (1997).