

物理探査手法を用いた地盤減衰特性評価ツールの開発

江波戸 昌徳*・信岡 大*・今井 幹浩*・小鹿 浩太*

Development of a Tool for Evaluating Ground Attenuation Characteristics Using Geophysical Exploration Technique

Masanori EBATO*, Dai NOBUOKA*, Mikihiro IMAI* and Kota KOSHIKA*

Abstract

In recent years, in order to assess the seismic safety of nuclear power generation facilities, the need for a detailed understanding of the ground attenuation characteristics has grown and hence surveys focusing on ground attenuation are being planned and implemented. In addition, since changes in pore fluids are associated with changes in ground attenuation, surveys on the amount of ground attenuation are also drawing attention for Carbon Capture and Storage (CCS) projects, etc. Thus, surveys on ground attenuation are likely to increase in the future. The authors have been actively surveying ground attenuation (Q-value) using PS logging for many years, and have developed a survey system and established measuring methods. To respond to the new market demand for surveys, this technology is now being applied to elastic wave tomography and VSP technology, to evaluate the amount of ground attenuation based on the changes in pore fluids. This paper explains the approaches being taken at OYO Corporation and on new technical developments. First we outline the basic theory and then introduce the ground attenuation (Q-value) survey using PS logging which we have been using to accumulate data, including the measurement principle. We then describe the attenuation tomography that is now being developed. Finally, we indicate the future direction and vision of our development.

Keywords: Attenuation characteristics, Q-value, PS logging, Attenuation tomography, VSP

(要 旨)

近年、原子力発電施設の耐震安全性を評価する上で地盤減衰特性を詳細に把握することが求められ、地盤減衰に着目した調査が計画・実施される傾向にある。これに加え、間隙流体の変化が地盤減衰特性の変化と関連することから、CCS (Carbon Capture and Storage) 事業分野などのモニタリング調査において地盤減衰に着目した調査が目立っている。これらの点より、地盤の減衰量に着目した調査ニーズは今後益々高まると考えられる。著者らは数年前よりPS検層を用いた地盤減衰 (Q値) 調査に積極的に取り組み、調査システムの開発および測定方法を確立するなど成果を挙げてきた。市場の新たな調査ニーズに対応することを目的とし、この技術を弾性波トモグラフィおよびVSP技術に応用して間隙流体の相違による地盤の減衰量を評価するための技術の開発に取り組んでいる。本稿では応用地質における地盤減衰調査への取り組み、および新規開発技術に関して紹介する。はじめに、地盤減衰の基礎理論を概説し、調査実績を重ねてきたPS検層を用いた地盤減衰 (Q値) 調査について測定原理を含めて紹介する。続いて新規に開発に取り組んでいる減衰トモグラフィの概要を紹介する。最後に開発の方向性および開発ビジョンを示すとともに今後の展望を述べる。

キーワード: 減衰特性, Q値, PS検層, 減衰トモグラフィ, VSP

* 応用地質(株)エネルギー事業部

* OYO Corporation Energy Business Division

1. はじめに

物理探査手法を用いた地盤減衰特性の評価に関しては、古くから検層技術（PS 検層、音波検層）を主体とした検討が行われてきた。Imai et al. (1980)¹⁾は PS 検層の手法を用いた地盤減衰（Q 値）調査に関し理論的検討および測定データからその有用性を示している。しかしながら、地盤減衰を評価するための調査ニーズが少なかったこと、および深部調査に対応した調査システムが普及していなかったことより、土木分野でスタンダードな調査手法に発展してこなかった。

1995 年の兵庫県南部地震以降、原子力発電施設を始めとする大規模施設において耐震安全性の向上への取り組みが進められ、地盤モデルを詳細に構築し地震動応答解析を実施することが求められるようになった。地震動応答解析を実施する上で必要とされる地盤モデルは、地盤構造と地盤物性で構成される。反射法地震探査、VSP 探査等を実施することにより断層構造、不整形性、堆積層の層厚等の地盤構造を評価し、主として物理検層を実施することにより地盤物性（速度、密度、減衰量）を把握する。地盤モデルは物理検層等により得られた物性値を地盤構造に外挿することで構築される。耐震安全性を評価する上で地盤の減衰量は重要な物性値とされ、様々な方法で地盤減衰を評価するための調査が行われている。この中でも、自然地震の観測を必要としない物理探査手法を用いた調査に関心が集まり調査が実施される傾向にある。

応用地質では大規模施設における地質調査ニーズに対応するためにハードウェアを開発²⁾するとともに、測定方法および解析方法について検討を重ね、成果を挙げてきた。これらの取り組みの結果、地盤の微小な変化を「地盤減衰量」として捉える調査基盤を確立した。

CCS (Carbon Capture and Storage) 事業を始めとする地球環境分野やメタンハイドレートに代表される非在来型資源開発分野では、間隙流体の相違および変化に起因して地盤の減衰特性が変化することに着目し、モニタリング調査により初期地盤からの状態変化を把握する手法に関心が集められている^{3), 4)}。筆者らは、市場の新たな調査ニーズに対応することを目的とし、弾性波トモグラフィおよび VSP 探査と地盤減衰調査を融合させた調査技術（2次元領域）の開発に取り組んでいる。

本稿では、はじめに地盤減衰の基礎について概説し、これまでに調査実績を積み重ねてきた PS 検層の手法を用いた地盤減衰（Q 値）調査について紹介する。これに続き、新規開発に取り組んでいる減衰トモグラフィについて概要を述べる。

2. 地盤減衰の基礎理論

媒質中を伝播する波は伝播距離、非弾性効果および

媒質の不均質性が原因となり減衰する特性を持つことから、減衰のメカニズムは大きく幾何減衰、内部減衰（履歴減衰）、散乱減衰（弾性減衰）に区分される。

一般に、地盤減衰量は減衰定数（ h ）もしくはその逆数（Q 値）として評価される。はじめに PS 検層の手法を用いた地盤減衰調査で一般に用いられる Q 値について説明し、続いて減衰定数（ h ）との関係を示す。

自然地震観測および物理探査手法を用いた調査で得られる地盤減衰量（Q 値）は内部減衰、散乱減衰の両効果を含んだ値であるとされ、式（1）で示される⁵⁾。

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{\text{int}}} + \frac{1}{Q_{\text{scat}}} \quad (1)$$

Q : 測定で得られる Q 値

Q_{int} : 内部減衰

Q_{scat} : 散乱減衰

内部減衰（ Q_{int} ）は一周期あたりのエネルギー変化として式（2）で示される⁶⁾。

$$Q_{\text{int}} = \frac{2\pi E}{\Delta E} \quad (2)$$

E : 一周期あたりの波動のエネルギー

ΔE : 一周期あたりの損失エネルギー

平面波が不均質媒質を伝播する場合、振源からの距離 x 、時間 t における観測振幅は式（3）で示される⁷⁾。

$$U(x, t) = U_0 \exp[-\alpha(f)x] \exp[i(\omega t - \kappa(f)x)] \quad (3)$$

U : 観測振幅, U_0 : 初期振幅,

ω : 角周波数, f : 周波数

$\alpha(f)$: 減衰係数, $\kappa(f) = \frac{f}{v(f)}$: 分散波数

Q_{int} と減衰係数 $\alpha(f)$ の関係は、波のエネルギーが振幅の 2 乗に比例すること、式（2）、および式（3）に示す減衰項（ $\exp[-\alpha(f)x]$ ）より式（4）で示される^{8), 9)}。

$$Q_{\text{int}}(f) = \left(\frac{2\pi}{1 - \exp(-2\alpha(f)\lambda(f))} \right) \quad (4)$$

減衰が十分小さいときは式（4）をテイラー展開することで式（5）として示される^{8), 9)}。

$$Q_{\text{int}}(f) = \left(\frac{\pi}{\alpha(f)\lambda(f)} \right) = \left(\frac{\pi f}{\alpha(f)v(f)} \right) \quad (5)$$

式（1）の散乱減衰の効果を考慮することにより、観測値から地盤の内部減衰量を評価することができる。

また、Q 値と減衰定数（ h ）の関係は、減衰が十分に小さいとき式（6）で示される^{8), 9)}。

$$h(f) = \frac{\alpha(f)v(f)}{2\pi f} = \frac{1}{2Q_{\text{int}}(f)} \quad (6)$$

3. PS検層の手法を用いた地盤減衰(Q値)調査

PS 検層の手法を用いた Q 値調査とは、地表で人工的に励起した振動を孔内に設置した受振器で収録し、収録した記録の振幅値を解析することで地盤減衰量を評価する調査手法である。

一般に、土木分野における PS 検層の振動源としては、P 波では火薬および重錘落下による方法、S 波では板たたきによる方法が用いられてきた。しかしながら、これらの手法は起振ごとのエネルギーにばらつきが大きいこと、および起振の周波数制御ができないことから地盤の減衰量を精度よく把握する上でいくつかの課題がある手法であると言える。

これらの問題点を解消することを目的とし、近年では振源としてバイブレータ型の振源を用いた調査が実施される傾向にあり、PS 検層の手法を用いた Q 値調査としてスタンダードな方法となりつつある^{9), 10), 11)}。図-1 に PS 検層の手法を用いた調査の概念図を示す。

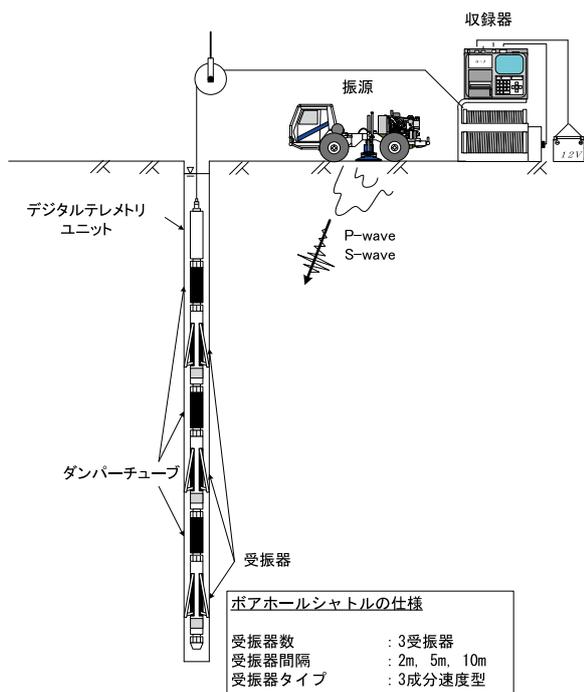


図-1 PS 検層 (Q 値調査) 調査模式図
Fig. 1 Schematic diagram of PS logging (Q-value survey) method

PS 検層における各観測点での振幅値 (U) は、式 (3) の減衰項に幾何減衰 (G)、散乱減衰 (T) の項を加え、式 (7) で示される。

$$U(x,t) = U_0 \exp[-\alpha(f)x]GT \quad (7)$$

式 (7) に示される観測振幅を用いて振幅スペクトル法および最大振幅法により解析を行い、速度区分ごとの Q 値を算出する。

【振幅スペクトル法】

- ① 初動走時解析により地盤速度を求める
- ② 観測波形の初動近傍の波形を切り出す (タイムウィンドウ処理)
- ③ 各観測点記録およびパイロットシグナル (振源における起振波形) の波形記録をフーリエ変換しフーリエ振幅を計算する
- ④ 各観測点記録の振幅スペクトルをパイロットシグナルの振幅スペクトルで除して正規化する
- ⑤ 同一速度区分内では散乱減衰の影響がないと仮定し、式 (7) の T を $T=1.0$ と定数化する
- ⑥ 式 (7) の対数をとる (式 (8))

$$\ln\left(\frac{U}{G}\right) = -\alpha(f)x + \ln(U_0) \quad (8)$$

- ⑦ 最小二乗法にて傾き $\alpha(f)$ を求め、Q 値を算出する

【最大振幅法】

- ① 初動走時解析により地盤速度を求める
- ② 観測波形の初動近傍の波形を切り出す (タイムウィンドウ処理)
- ③ 各観測点記録の振幅値をパイロットシグナルの振幅値で除して正規化する
- ④ 速度層区分ごとの卓越周波数を計算する
- ⑤ 振幅スペクトル法の⑤~⑦と同じ手順で Q 値を算出する

図-2 に測定で得られた収録記録の一例⁹⁾を示し、図-3~図-8 に解析処理の流れおよび振幅分布の一例^{9), 11)}を示す。

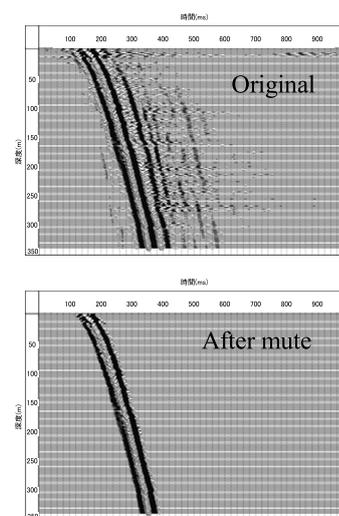


図-2 PS 検層 (Q 値調査) 収録記録例⁹⁾
Fig. 2 Example of PS logging (Q-value survey) recorded data⁹⁾

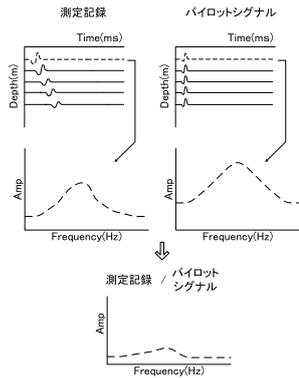


図-3 振幅スペクトル正規化模式図
Fig. 3 Schematic diagram of normalized amplitude spectrum

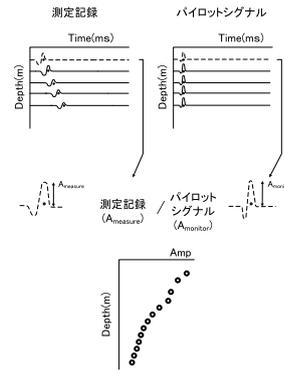


図-6 最大振幅正規化模式図
Fig. 6 Schematic diagram of normalized maximum amplitude

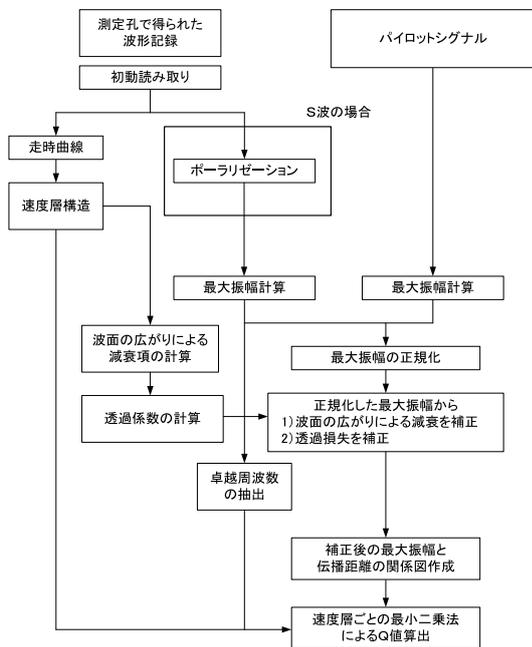


図-4 振幅スペクトル法による解析の流れ
Fig. 4 Analysis flow by the amplitude spectrum method

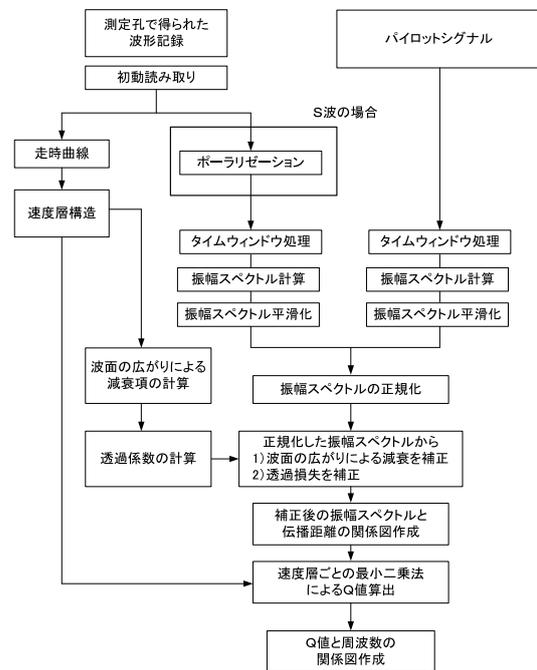


図-7 最大振幅法による解析の流れ
Fig. 7 Analysis flow by the maximum amplitude method

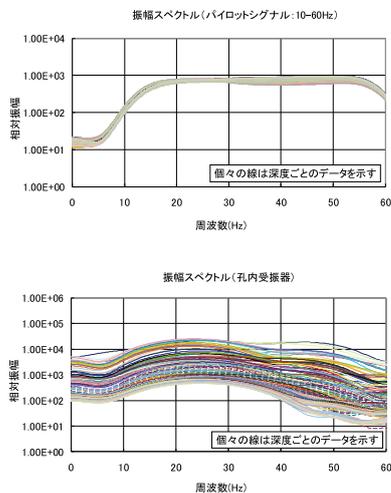


図-5 振幅スペクトル分布図¹¹⁾
Fig. 5 Amplitude spectrum distribution¹¹⁾

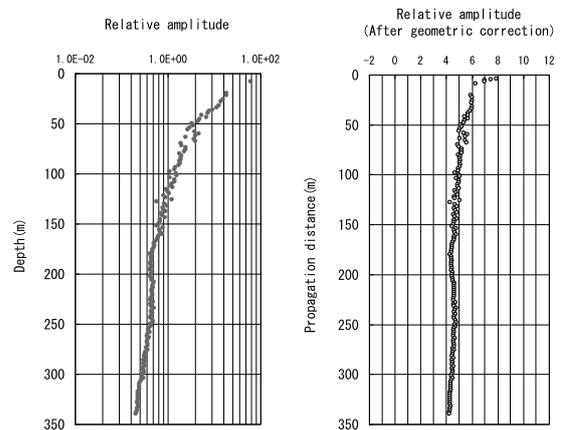


図-8 最大振幅分布図⁹⁾
Fig. 8 Maximum Amplitude distribution⁹⁾

4. 減衰トモグラフィ

近年、CCS 事業分野およびメタンハイドレート事業分野において弾性波の減衰に着目した調査に関心が集まっている。この理由の一つとして、地盤内部の間隙流体の状態変化が、弾性波速度と比較し地盤減衰量に感度が高いことがあげられる^{3), 4)}。

筆者らは、PS 検層を用いた地盤減衰調査で蓄積した測定技術を応用し、これらの新規事業（地球環境分野、資源開発分野）において新たな調査手法を確立することを目的として、減衰トモグラフィの技術開発を行っている。減衰トモグラフィで得られる地盤情報は 2 次元（3 次元）情報であることから、ボーリング調査により得られる 1 次元情報と合わせて評価することでより詳細な地盤構造が把握できると期待される^{12), 13)}。

減衰トモグラフィの解析の流れを図-9 に示すとともに詳細について記載する。なお、基本的な考え方は安田ほか（1955）¹²⁾ が孔間レーダ測定による減衰トモグラフィに適用した方法を参考にしている。

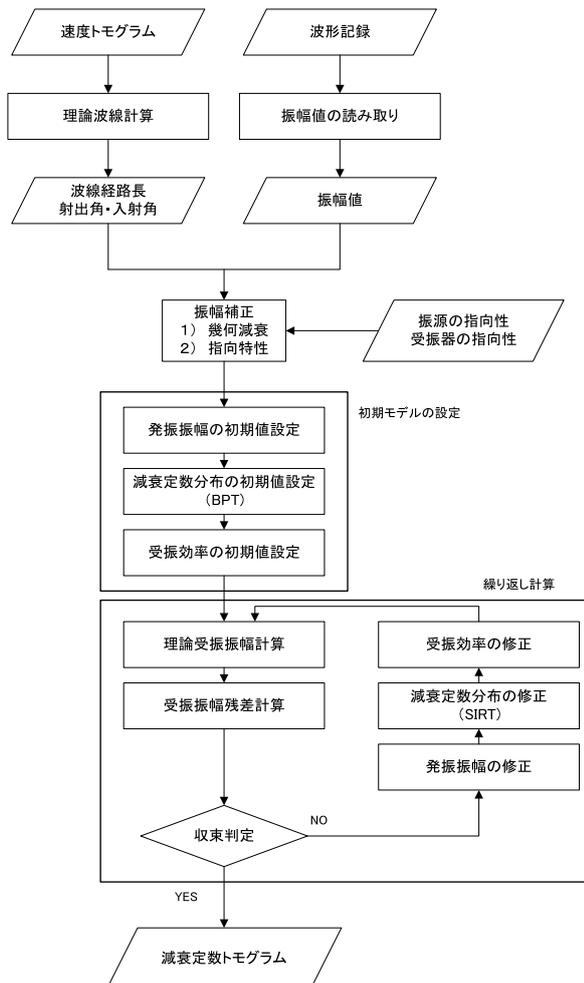


図-9 減衰トモグラフィ解析の流れ
Fig. 9 Analysis flow of attenuation tomography

4.1 弾性波速度構造の算出

式（5）および式（6）に示す通り、地盤減衰量を把握するためには地盤の弾性波速度構造の把握が必要である。地盤の弾性波速度を 2 次元（3 次元）情報として把握する調査手法として弾性波トモグラフィがあげられる。減衰トモグラフィ技術を用いた地盤減衰調査では、地盤の弾性波速度構造を把握する手法として弾性波トモグラフィ技術¹⁴⁾を用いる。弾性波トモグラフィ解析により、地盤の弾性波速度構造を把握するとともに、起振点-受振点ごとの波線経路および波線経路長が決定される。

4.2 振源パラメータ

地盤減衰の評価では、収録された弾性波の振幅情報を用いて解析を実施する。振源におけるパラメータとしては 1) 発振エネルギー、2) 発振効率（カップリング）、3) 振源指向性（ラディエーションパターン）、4) 射出角があげられる（図-10）。

減衰トモグラフィでは、PS 検層の手法を用いた Q 値調査と異なり振源位置を移動しながら調査対象範囲の測定を実施する。また、振源設置深度が受振点深度に対して深部、浅部、水平方向と様々な方向に設置されることとなる。このことより、PS 検層の手法を用いた Q 値測定においては考慮する必要のない上記 2) ~ 4) を振源パラメータとする必要がある。

4.3 受振パラメータ

受振点におけるパラメータとしては 1) 受振器感度、2) 受振効率（カップリング）、3) 受振器指向性（ラディエーションパターン）、4) 入射角があげられる（図-10）。

減衰トモグラフィでは、PS 検層の手法を用いた Q 値調査と異なり受振点深度が振源設置深度に対して深部、浅部、水平方向と様々な方向に設置されることとなる。このことより、PS 検層の手法を用いた Q 値測定においては考慮する必要のない上記 3) および 4) を受振パラメータとする必要がある。2) の受振効率に関しては、起振エネルギーの小さい減衰トモグラフィ調査ではカップリング効果が結果に大きく影響を与えるため、受振パラメータとして考慮する必要があると考えた。

ここで、振源および受振パラメータの効果についてサスペンション PS 検層記録を用いて示す（図-11）。サスペンション PS 検層ゾンは起振部と受振部が一体化したゾンデであり、振源と受振器の距離を一定に保ったまま測定を実施することができる。

図に示す波形はボーリング孔の拡孔前後（φ86 mm と φ120 mm）の収録記録であり、同じ深度かつ同一エネルギーで起振した記録を示す。収録記録から、孔の状態変化により収録される振幅値、および上部と下部の振幅値の傾きが異なることが確認できる。このこ

とより、実データを用いた検討からも発振および受振効率をパラメータとすべきであることが示された。

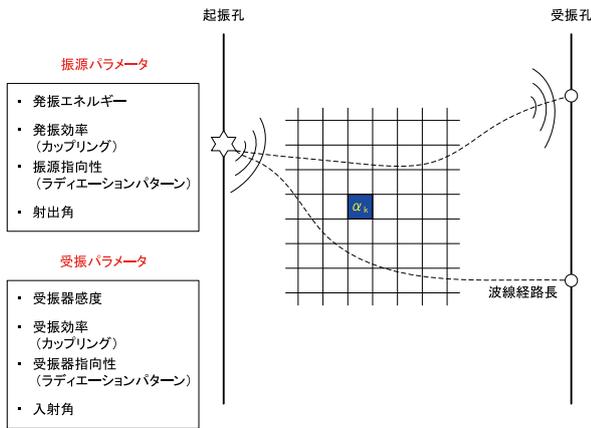


図-10 振源および受振パラメータ
Fig. 10 Seismic source and receiver parameters

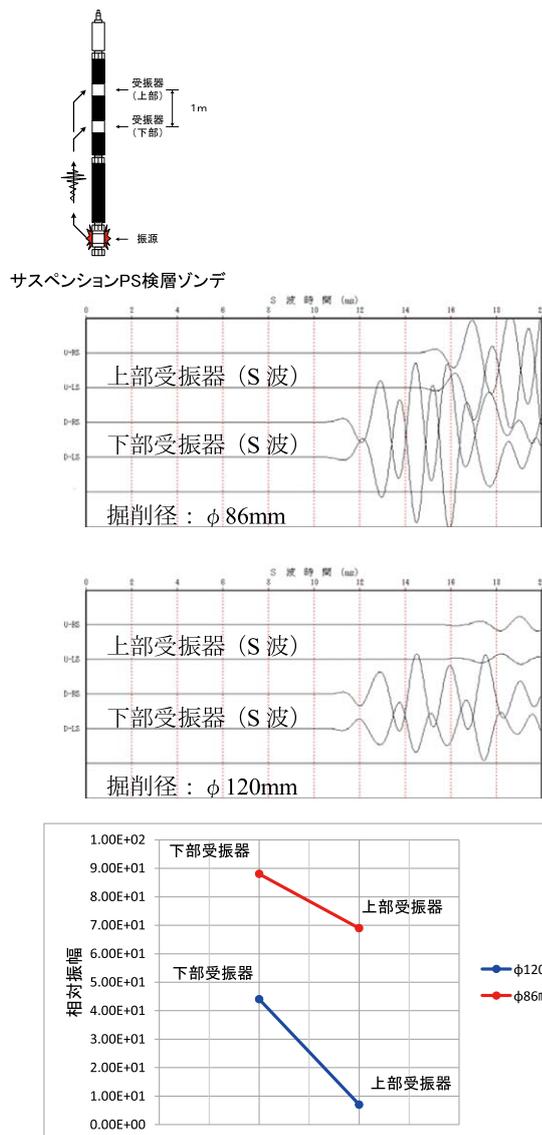


図-11 起振および受振パラメータの効果に関する検討
Fig. 11 Study on the effects of the source and receiver parameters

4.4 解析アルゴリズム

4.4.1 基礎理論

振源における起振 (振幅値 A_0) にて地盤内に射出された弾性波振幅 (振幅値 A_i) と任意の受振点に入射する弾性波振幅 (振幅値 A_r) の関係は式 (9) で示される。

$$A_r = \frac{A_i \exp(-\alpha L)}{L} \tag{9}$$

A_i : 地盤への発振振幅 (射出振幅), A_r : 入射振幅
 L : 波線経路長, α : 減衰係数

ここで、射出振幅は発振振幅、指向性、発振効率 (カップリング) より式 (10) で示される。

$$A_i = A_0 f_i c_i \tag{10}$$

A_0 : 振源の発振振幅, f_i : 振源の鉛直面内の指向性
 c_i : 発振効率

式 (10) に示すパラメータのうち、鉛直面内の指向性については振源の指向性および射出角が把握できれば算出が可能であるため、式 (10) の右辺の残りのパラメータを A'_i と置き換え式 (11) を得る。

$$A_i = A'_i f_i \tag{11}$$

また、受振器において受振される弾性波振幅 (A'_r) は式 (12) で示される。

$$A'_r = A_r f_r c_r G_r \tag{12}$$

f_r : 受振器の鉛直面内の指向性
 c_r : 受振効率, G_r : 受振器感度

射出振幅と同様、鉛直面内の指向性については受振器の指向性および入射角が把握できれば算出が可能であるため、式 (12) の右辺の $c_r G_r$ を K_r と置き換え式 (13) を得る。

$$A'_r = K_r A_r f_r \tag{13}$$

式 (11) と式 (13) を式 (9) に代入して整理することで式 (14) を得る。

$$A'_r = \frac{K_r A'_i \exp(-\alpha L)}{L} f_i f_r \tag{14}$$

ここで、波線経路長と射出角および入射角は弾性波トモグラフィにより計算されるため、波線経路長による幾何減衰補正および振源と受振器の指向性に関する補正 ($L/f_i f_r$) が可能となる。補正後の振幅値を式 (15) に示す。

$$A''_r = K_r A'_i \exp(-\alpha L) \tag{15}$$

式 (15) の対数をとることにより式 (16) を得る。

$$\log A'_i - \log A''_r + \log K_r = \alpha L \tag{16}$$

$\log A'_r = B_r$, $\log A''_r = B_r$, $\log K_r = C_r$ とすることにより, 式 (17) の線型方程式を得る.

$$B_r = B_i + C_r - \alpha L \quad (17)$$

式 (17) より, 地盤への発振振幅 (以後, 発振振幅と呼ぶ) と受振効率が把握できれば, 通常の弾性波トモグラフィ解析で用いる BPT (Back Projection Technique) や SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) を用いて減衰定数分布を再構成することが可能となる. しかしながら, 発振振幅が起振ごとに異なること, および受振効率も受振点ごとに異なることから式 (17) を即座に解くことはできない. そこで, 初期モデルとして 1) 発振振幅の初期値, 2) 受振効率の初期値, 3) 減衰定数分布の初期値を与え, 逐次近似法を用いて減衰定数分布を算出することとする.

4.4.2 初期モデルの作成

(1) 発振振幅の初期値

発振振幅の初期値 (B_{i0}) は共通起振点の受振振幅を波線経路長に対してプロットして直線回帰し, 距離 0 における切片を求めることで得られる.

(2) 受振効率の初期値

受振効率の初期モデルは $K_r = 1 (C_r = 0)$ とし, 受振効率の影響がないものと仮定する.

(3) 減衰定数の初期値

発振振幅および受振効率の初期値を用いることで式 (17) は式 (18) で示される.

$$B_{i0} - B_r = \alpha L \quad (18)$$

トモグラフィ解析は解析断面をセルに分割して解析を実施するため, セルごとの減衰定数を用いて式 (19) を得る.

$$B_{i0i} - B_{rij} = \sum_{k=1}^M \alpha_k l_{ijk} \quad (19)$$

B_{i0i} : i 番目の起振点の発振振幅

B_{rij} : i 番目の起振点, j 番目の受振点で観測された振幅

α_k : k 番目のセルの減衰定数

l_{ijk} : i 番目の起振点と j 番目の受振点の波線がセル k を通過する波線長

減衰定数の初期値は式 (20) に示す BPT により算出される.

$$\alpha_k = \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{j=1}^{Nr} \left\{ (B_{i0i} - B_{rij}) \cdot l_{ijk} / \sum_{k=1}^M l_{ijk} \right\} / \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{j=1}^{Nr} l_{ijk} \quad (20)$$

Nt : 起振点数, Nr : 受振点数, M : セル数

4.4.3 理論振幅の計算

受振振幅の理論値は, 上述の初期値または逆解析により修正したパラメータを式 (17) に代入することで求められる.

4.4.4 逆解析

理論振幅と観測振幅の残差が小さくなるよう逐次モデルを修正し, 最適な減衰定数トモグラムを算出する. 振幅残差の配分は, 式 (17) に示す発振振幅, 受振効率, 減衰定数の 3 項に配分する. 筆者らは残差の配分の方法に関し, 1) 発振振幅の修正, 2) 減衰定数の修正, 3) 受振効率の修正の流れで修正する手法を採用した (図-9).

(1) 発振振幅の修正

観測振幅と理論振幅の大局的な相違を発振振幅の修正により解消することを目的とする. 起振点ごとに残差の平均値を求め発振振幅の修正を行う.

(2) 減衰定数の修正

発振振幅の修正を行った後の残差を用いて波線経路沿いの減衰定数を修正する. 修正アルゴリズムとして弾性波トモグラフィで一般的な SIRT を用いる. 繰り返し計算 (計算回数 n 回) により得られた理論振幅 B_{Crj}^n は式 (21) で示される.

$$B_{Crj}^n = B_{i0i}^{n-1} - \sum_{k=1}^M (\alpha_k^{n-1} \cdot l_{ijk}) + C_{rj}^{n-1} \quad (21)$$

また, 振幅残差 ΔB_{ij}^n は式 (22) で示される.

$$\Delta B_{ij}^n = B_{rij} - B_{Crj}^n \quad (22)$$

したがって, n 回目の繰り返し計算における k 番目のセルの減衰定数の修正量は式 (23) で示される.

$$\Delta \alpha_k^n = \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{j=1}^{Nr} \left\{ \Delta B_{ij}^n \cdot l_{ijk} / \sum_{k=1}^M l_{ijk} \right\} / \sum_{i=1}^{Nt} \sum_{j=1}^{Nr} l_{ijk} \quad (23)$$

式 (23) の修正量を $n-1$ 回目の計算で得られた減衰定数に加算することで減衰定数モデルを得る.

(3) 受振効率の修正

受振効率の修正は減衰定数の修正を行ったモデルに対して理論計算を実施し, 受振点ごとに残差の平均値を求め受振効率の修正を行う. ただし, 受振効率は最大値が $K_r = 1 (C_r = 0)$ となるように正規化する.

(4) 減衰トモグラムの算出

繰り返し計算を実施し, 残差が小さくなった時点で計算を終了し, 減衰定数トモグラムを得る. 減衰定数から減衰係数 (h) および Q 値の変換は式 (5) および式 (6) を用いて行う.

4.4.5 課題

減衰トモグラフィ解析では逆解析による修正パラメータが1) 減衰定数, 2) 発振振幅, 3) 受振効率, の3パラメータとなる。

振源の安定した起振力が保証され, かつ発振効率が起振点ごとに大きく変化しない場合, および受振点ごとの受振効率が大きく変化しない場合は振源の指向性, 受振器の指向性を考慮することのみで精度よく減衰定数を評価できると考えられるが, 現実的には発振振幅, 発振効率および受振効率が異なるため逆解析を実施する際はそれぞれのパラメータがトレードオフの関係となる。発振効率および受振効率の影響を数値計算等により検討することが求められる。

5. まとめ

地盤減衰特性を評価する調査手法について地盤減衰の基礎理論を概説するとともに, 調査実績を積み重ねてきたPS検層を用いた地盤減衰(Q値)調査を紹介し, 新規に開発を行っている減衰トモグラフィについて概要を紹介した。

地盤の減衰量に着目した調査ニーズは様々な事業分野において今後益々高まると予想される。これらの市場ニーズに応えるために減衰トモグラフィ技術の開発を進め, 主要な調査手法として確立していく予定である。

今後の展望として, 比較的ジオメトリが単純な室内試験試料(コア試料)を用いたトモグラフィ測定を実施し, データ取得および解析技術を蓄積することで手法を確立させ, 実地盤への展開を図りたい。

参 考 文 献

- 1) Imai, T. ; Tonouchi, K. ; and Kanemori, T. Evaluation of Q value using S-wave logging Records. OYO Technical report. 1980, 2, p. 51-69.
- 2) 坂下晋, 高橋進, 井上友光. ダウンホール PS 検層の大深度ボーリングへの適用実験. 物理探査学会第122回学術講演会論文集. 2010, p. 209-212.
- 3) 財団法人 地球環境産業技術研究機構. 平成20年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発. 2008, p. 21-36.
- 4) 松島潤. VSP 記録を用いたメタンハイドレート層の減衰解析. 物理探査学会第111回学術講演会論文集. 2004, p. 108-111.
- 5) 物理探査学会. 物理探査ハンドブック手法編. 1998, p. 753-754.
- 6) Aki, K. ; Richards, P.G. Quantitative Seismology second edition. University science book. 2009, p. 161-176.
- 7) Wang, Y. ; Seismic Inverse Q Filtering, Blackwell Publising. 2008, p. 3-5.
- 8) 今村杉夫, 東宏幸, 林宏一. 速度構造がダウンホール PS 検層による Q 値解析結果に与える影響について. 物理探査学会第106回学術講演会論文集. 2002, p. 117-120.
- 9) 信岡大, 東宏幸, 大場政章. PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q 値)の評価. 物理探査. 2012, 65, 1&2, p. 79-90.
- 10) 信岡大, 林宏一, 大場政章. 鉛直アレイ地震計を利用した Q 値測定法の検討—人工振源を用いた調査手法—. 物理探査学会第122回学術講演会論文集. 2010, p. 217-220.
- 11) 信岡大, 羽田昌幸, 川里健, 大場政章. 人工振源を用いた硬岩サイトにおける Q 値測定. 物理探査学会第125回学術講演会論文集. 2011, p. 213-216.
- 12) 安田登, 木村鷹志, 斎藤秀樹, 兼崎幸雄. クロスホールレーダートモグラフィのグラウト効果判定への適用性と今後の課題. 物理探査学会第93回学術講演会論文集. 1995, p. 231-235.
- 13) 渡部俊樹, 佐々宏一. 弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ. 物理探査. 1992, 45, 1, p. 10-21.
- 14) Saito, H. Seismic Traveltime Tomography for Shallow Subsurface Exploration. Ph.D. Thesis, Hokkaido University, 2001.