

PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性 (Q 値) の評価

信岡 大*・東 宏幸*・大場政章**

要 旨

本稿は、地盤減衰特性の評価手法のうち PS 検層の手法について紹介し、調査事例の報告を行なうものである。PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性の評価法とは、地表にて人工的に弾性波を発生させ、地盤中を伝播する弾性波をボーリング孔内に設置した多数の受振器で収録し、収録された振幅を弾性波速度層区分ごとに解析することにより地盤減衰特性 (Q 値) を求める手法であり、大規模な観測システムを必要とせず、かつ Q 値を高精度に求めることができる手法として注目される。また、周波数ごとに Q 値を評価できることも特徴である。弾性波の地盤減衰特性について概説し、次いで PS 検層の手法を用いた Q 値の評価方法についての解説を行った後、硬岩、軟岩の両サイトで実施した調査事例を示した。調査事例では、人工振源としてミニバイブレータ振源を用いた調査事例を示した。調査事例より、S/N の良い記録が収録され、弾性波速度層区分ごとの詳細な Q 値が把握できた。結果の考察より、従来の PS 検層の手法により求めた Q 値が地層内の亀裂に起因する散乱減衰の効果を含む値であることを示した。これらの結果より、PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性調査の有用性が示された。

キーワード：地盤減衰特性・Q 値・PS 検層・バイブレータ振源

1. はじめに

大規模構造物を建設するにあたり、耐震安全性評価のための地盤応答解析に用いる地盤モデルを詳細に構築することが重要となる。地盤モデルは大きく 1) 地盤構造 (断層構造、不整形性、堆積層の層厚など) の把握およびモデルの構築、2) 地盤物性の把握およびモデルの構築で構成される。地盤構造 (地盤形状) が地震動の増幅に大きく関与した例として、1995 年の兵庫県南部地震、2007 年の中越沖地震が挙げられ、広域に渡る地下構造把握の必要性が指摘された (例えば、源栄・永野, 1996)。また、中越沖地震は、地盤形状に加え堆積層が厚いことが地震動の増幅に大きく関与した例として挙げられ、地表から地下深部に渡る詳細な地盤物性把握の必要性が示された (例えば、渡部ほか, 2011)。

地盤物性に関しては、主として S 波速度および S 波の

地盤減衰特性が重要視され、これらの詳細な把握が求められる傾向にある。地盤減衰特性については、一般に 1) 自然地震の観測および解析による評価、2) 人工振源により強制的に発振した弾性波の観測および解析による評価のいずれかの手法により評価が行われ、地盤モデルに反映される。

自然地震を利用した調査手法は、地震観測システムで得られた地震記録を解析することにより地盤の減衰特性を算出する手法であり、スペクトル比法、レシーバ関数法、スペクトルインバージョン法、減衰トモグラフィ法などが挙げられる。自然地震を利用した手法では、自然地震の周波数帯域で地盤減衰特性を評価できるという利点を有する一方、観測システム (鉛直地震計アレイシステム) の構築が必要であること、地震の到来方向および伝播経路の影響を考慮する必要があること、観測点が少ないことに起因する精度の低下が懸念されること、逆解

2011 年 9 月 8 日原稿受付; 2012 年 4 月 26 日受理

第 125 回(平成 23 年度秋季)学術講演会にて一部を発表

* 応用地質株式会社 エネルギー事業部

〒336-0015 埼玉県さいたま市南区太田窪 2-2-19

** 日本原子力発電株式会社 開発計画室 建築設計・耐震グループ

〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町 1-1 (美土代ビル)

© 2012 SEGJ

析の手法により地盤減衰特性を算出することから他のパラメータとのトレードオフを考慮する必要があること、解析を行う上で有意な地震の発生後の解析・評価となることなど、いくつかの課題が指摘される。

人工振源を利用した調査手法は、主に地表で人工的に発振させた弾性波を地表もしくは孔内に設置した受振器で観測し、これらを解析することにより地盤の減衰特性を算出する手法であり、PS 検層の手法を用いる方法、音波検層の手法を用いる方法、屈折法探査の手法を用いる方法などが挙げられる。人工振源を利用した調査手法では、大規模な観測システムを必要とせず簡便・低コストかつ高密度な測定が可能であり、より詳細な地盤減衰特性が評価できる一方、自然地震の周波数帯域よりもやや高周波側での評価となることが課題として指摘される。

大規模施設を建設する上で、建設前の地盤調査、建設後の安全性評価のための継続的な地盤調査が重要となる。人工振源を用いた調査手法は、自然地震の発生が不要であることおよび弾性波の伝播メカニズムが自然地震と比較して単純であることから、地盤減衰特性を評価するための調査手法として採用される傾向にある。特に、ボーリング孔を利用した PS 検層の手法を用いる方法は、原位置でのデータを高密度に収録することができることからその有効性が認識され、地盤減衰特性の調査手法として確立しつつある。

本稿では、PS 検層の手法を用いた地盤減衰特性（以下、Q 値と呼ぶ）の評価に関する調査事例を示す。始めに弾性波の地盤減衰特性について概説し、次いで PS 検層の手法を用いた Q 値の評価方法についての解説を行った後、調査事例について報告する。最後に、散乱減衰の影響が PS 検層の手法を用いた Q 値評価に与える影響について検討を行う。

2. 弾性波の地盤減衰特性

媒質中を伝播する波は、伝播距離、媒質の不均質性および非弾性効果が原因となり、減衰する特性を持つ。減衰のメカニズムは大きく幾何減衰、内部減衰（吸収減衰）、散乱減衰（弾性減衰）に区分される。一般に、測定で得られる Q 値とは、上記の内部減衰、散乱減衰の効果が含まれた値とされており、式(1)で示される（物理探査学会、1998）。

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

Q: 測定で得られる Q 値

Q_{int} : 内部減衰, Q_{scat} : 散乱減衰

2.1 内部減衰特性 (Q_{int}) の定式化

内部減衰特性を示す指標として Q_{int} が定義され、式(2)で示される（Aki and Richards, 2009）。

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

E: 一周あたりの波動のエネルギー

ΔE : 一周あたりの失われるエネルギー

ここで、振源から距離 x 、時間 t における平面波を考える。

媒質が弾性体で吸収による減衰が無い場合には、 x 方向に進行する平面波は式(3)で示される（Wang, 2008）。

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

U : 観測振幅, U_0 : 初期振幅, ω : 角周波数, k : 波数

一方、平面波が不均質媒質を伝播する場合、複素波数 K は、減衰係数 $\alpha(f)$ 、分散波数 $\kappa(f)$ により式(4)で示される（Wang, 2008）。

$$K = \kappa(f) - i\alpha(f) \quad (4)$$

$$\kappa(f) = \frac{f}{v(f)} \quad \kappa(f) \equiv \text{Re}(k), \quad v(f): \text{分散位相速度}$$

式(4)を式(3)に代入することにより、式(5)が得られる（Wang, 2008）。

$$U(x, t) = U_0 \exp[-\alpha(f)x] \exp[i(\omega t - \kappa(f)x)] \quad (5)$$

式(5)の $\exp[-\alpha(f)x]$ が、距離 x を伝播した波の減衰を示し、減衰係数 $\alpha(f) = 0$ の場合、式(5) = 式(3)となり完全弾性体を示す。

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(5) の減衰項より、式(6)で示される（今村ほか、2002）。

$$E = S U_1^2, \quad \Delta E = S(U_1^2 - U_2^2) \quad S: \text{比例係数}$$

$$\frac{2\pi}{Q_{\text{int}}} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{U_1^2} = 1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

$$U_1 = U_0 \exp[-\alpha(f)x]:$$

距離 x を伝播した波の振幅

$$U_2 = U_0 \exp[-\alpha(f)(x + \lambda(f))]:$$

距離 x から一波長進んだ波の振幅

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{Q_{\text{int}}(f)} &= 1 - \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = 1 - \left(\frac{U_0 \exp[-\alpha(f)(x + \lambda(f))]}{U_0 \exp[-\alpha(f)x]}\right)^2 \\ &= 1 - (\exp(-\alpha(f)\lambda(f)))^2 \\ &= 1 - \exp(-2\alpha(f)\lambda(f)) \end{aligned}$$

$$Q_{\text{int}}(f) = \left(\frac{2\pi}{1 - \exp(-2\alpha(f)\lambda(f))} \right) \quad (6)$$

式(6)をテイラー展開することにより、式(7)が得られる（今村ほか、2002）。

$$Q_{\text{int}}(f) = \left(\frac{2\pi}{1 - \left\{ 1 - [2\alpha(f)\lambda(f)] + \frac{[2\alpha(f)\lambda(f)]^2}{2} - \frac{[2\alpha(f)\lambda(f)]^3}{3} + \dots \right\}} \right) \quad (7)$$

減衰が十分小さい時、 Q_{int} と減衰係数 $\alpha(f)$ の関係は式(8)で示される（今村ほか，2002）。

$$Q_{\text{int}}(f) = \left(\frac{\pi}{\alpha(f)\lambda(f)} \right) = \left(\frac{\pi f}{\alpha(f)v(f)} \right) \quad (8)$$

2.2 Q_{int} と減衰定数（ h ）の関係

一般に、地盤減衰特性を評価する上で、上述した Q_{int} 、減衰係数 α に加え、減衰定数 h が用いられる。減衰定数は耐震設計時の地盤応答解析で利用されるため、ここでは Q_{int} 、減衰係数 α 、および減衰定数 h の関係を示す。

Fig.1 に一質点減衰モデルを示す。また、Fig.2 にモデルに静的変位 U を与えた場合の減衰自由振動の模式図を示す。このとき、減衰振動は式(9)の運動方程式で示される（Lay and Wallace, 1995）。

$$m\ddot{U} + \gamma(f)\dot{U} + kU = \ddot{U} + \left(\frac{\gamma(f)}{m} \right)\dot{U} + \left(\frac{k}{m} \right)U \quad (9)$$

$$= \ddot{U} + 2h(f)\omega_0 \dot{U} + \omega_0^2 U = 0$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} : \text{固有振動数}, \quad h(f) = \frac{\gamma(f)}{2\sqrt{mk}} : \text{減衰定数}$$

式(9)の一般解は式(10)で示される（Lay and Wallace, 1995）。

$$U = U_0 \exp(-h(f)\omega_0 t) \sin(\sqrt{1-h(f)^2} \omega_0 t + \phi) \quad (10)$$

ϕ : 初期位相

したがって、Fig.2 に示す振幅の包絡線は式(11)で示される（Lay and Wallace, 1995）。

$$U = U_0 \exp(-h(f)\omega_0 t) \quad (11)$$

減衰振動の周期ごとの振幅比は、式(12)および式(13)で示される。

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{a_2}{a_3} = \frac{a_3}{a_4} = \dots \right) = \frac{\exp(-h(f)\omega_0 t_1)}{\exp[-h(f)\omega_0 (t_1 + T)]} = \exp(h(f)\omega_0 T)$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \left(\frac{a_2}{a_3} = \frac{a_3}{a_4} = \dots \right) = \frac{U_0 \exp(-\alpha(f)x)}{U_0 \exp(-\alpha(f)(x + \lambda(f)))} = \exp[\alpha(f)\lambda(f)] \quad (12)$$

式(12)および式(13)より、減衰係数 α と減衰定数 h の関係は式(14)で示される（今村ほか，2002）。

$$h(f)\omega_0 T = \frac{2\pi h(f)}{\sqrt{1-h(f)^2}} = \alpha(f)\lambda(f)$$

$$\lambda(f) = v(f)/f \quad \text{より}$$

$$h(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f}{\alpha(f)v(f)} \right)^2 + 1}} \quad (14)$$

減衰が十分小さい時、減衰定数 h と Q_{int} の関係は式(15)で示される（今村ほか，2002）。

$$h(f) = \frac{\alpha(f)v(f)}{2\pi f} = \frac{1}{2Q_{\text{int}}(f)} \quad (15)$$

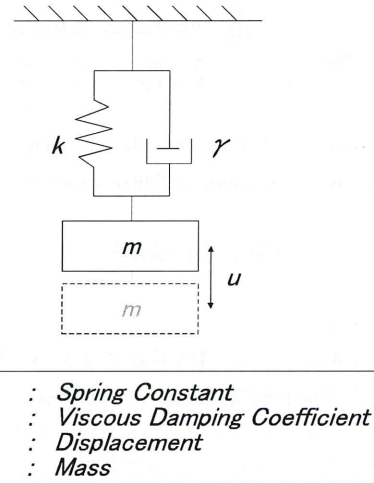


Fig.1. Schematic display of the standard linear solid model.

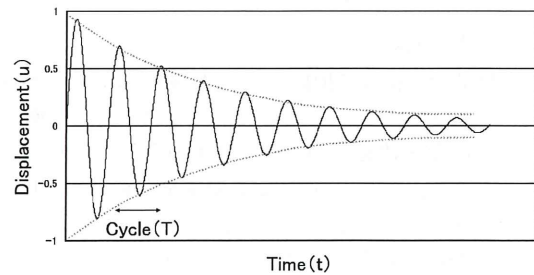


Fig.2. Schematic display of the free damped vibration.

3. PS 検層の手法を用いた Q 値の評価方法

PS 検層の手法を用いた Q 値の調査では、地表で人工的に弾性波を発振させ、ボーリング孔内に設置した多数の観測点で収録した記録の振幅値を解析することにより Q 値を評価する（Imai et al., 1980）。

Fig.3 に PS 検層の手法を用いた調査の概念図を示す。

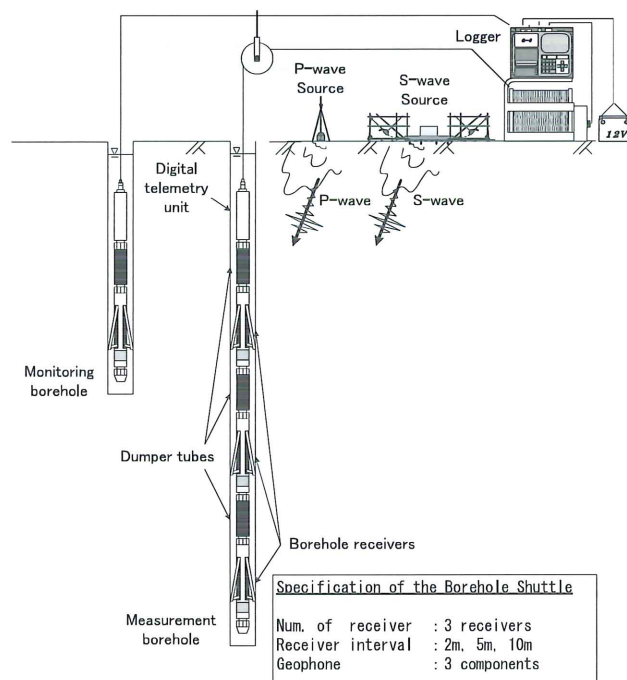


Fig.3. Schematic display of the ground attenuation measurement using PS-logging method.

測定系は、人工振源、孔内受振器、データ収録器で構成される。

1) 人工振源

人工振源として、PS 検層で従来から利用されている重錘落下振源 (P 波)、板叩き振源 (S 波) に加え、パイブレータ型振源 (P 波、S 波) を用いた事例がある。パイブレータ型振源は、広周波数帯域の弾性波を安定して発振することが可能であることから、Q 値を詳細に調査する上で有効な振源であると考えられる。

2) 孔内受振器

Q 値を高精度に把握するには、微弱な信号を S/N 良く収録することが重要となる。このため、孔壁圧着型の受振器を用いた調査が実施される傾向にある。また、ゾンデ内で A/D 変換を実施して地上にデータを転送するシステムを採用するなど、ノイズの影響を低減するシステムが有効であると考えられる。

3) データ収録器

収録器は、パイブレータ型振源の測定に対応するため、高サンプリングレートかつ高サンプリング数の収録に対応できるシステムが必要となる。

観測点における振幅値 (U) は、式(5)に幾何減衰 (G)、散乱減衰 (T) の項を加え、式(16)で示される (今村ほか, 2002)。

$$U(x, t) = U_0 \exp[-\alpha(f)x] \exp[i(\omega t - \kappa(f)x)] GT \quad (16)$$

地盤の減衰特性を評価する上で、式(16)の地盤減衰に関する項のみを抽出し式(17)を得る (今村ほか, 2002)。

$$U(x, t) = U_0 \exp[-\alpha(f)x] GT \quad (17)$$

PS 検層の手法を用いた Q 値の解析は、以下の手順で解析を実施し Q 値および減衰定数 (h) を算出する。

<振幅スペクトル法>

- ① PS 検層の初動走時解析により、地盤速度構造を求める。
- ② 各観測点の波形記録のうち、初動走時近傍の波形を抽出する。
- ③ 各観測点 (各測定深度) およびモニタ孔の波形記録をフーリエ変換し、振幅スペクトルを計算する (Fig.4)。
- ④ 各測定点 (各測定深度) の振幅スペクトルをモニタ孔の振幅スペクトルで除して規準化する (Fig.4)。
- ⑤ 同一層内で散乱減衰の影響は無いと仮定し、式(17)の $T=1$ と定数化する。
- ⑥ 式(17)の対数を取り、式(18)を得る。

$$\ln\left(\frac{U}{G}\right) = -\alpha(f)x + \ln(U_0) \quad (18)$$

- ⑦ U/G および x は観測から得られるため、速度層区分ごとに最小二乗法にて傾き $\alpha(f)$ を求める。ここで、幾何減衰項 G は 1) 振源と受振器の距離の逆数、2) 等価振源距離 (狐崎, 1967) の逆数により算出する。本稿の調査事例では、等価振源距離により幾何減衰項の補正を行った。
- ⑧ 求めた $\alpha(f)$ 、弾性波速度から、周波数ごとの Q 値 (Q_{int}) および減衰定数 (h) を算出する。

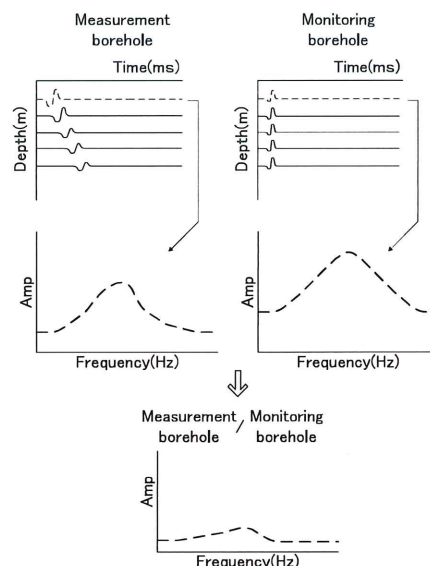


Fig.4. Schematic display of normalization of a spectrum.

Fig.5 に PS 検層の手法を用いた Q 値の評価方法概念図を示す。

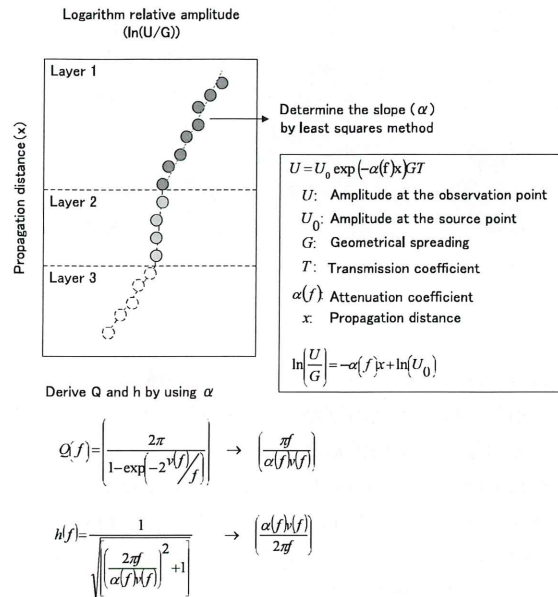


Fig.5. Concept of the Q-value calculation using PS logging method.

＜最大振幅法＞

- ① PS 検層の初動走時解析により、地盤速度構造を求める。
- ② 各観測点の波形記録のうち、初動走時近傍の波形を抽出する。
- ③ 各観測点（各測定深度）の振幅値をモニタ孔の振幅値で除して規準化する(Fig.6)。
- ④ 振幅スペクトル法の⑤～⑧の手順同様の計算を実施する。ただし、周波数(f)は同一層内の波形記録の平均周波数とする。

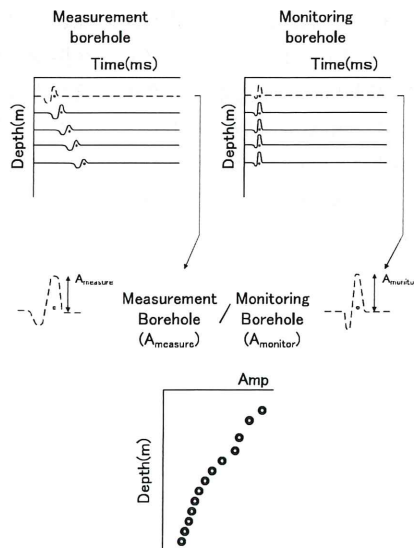


Fig.6. Schematic display of normalization of an amplitude.

4. 調査事例

PS 検層の手法を用いて Q 値を評価することを目的とし、花崗岩主体の硬岩サイトおよび砂質泥岩主体の軟岩サイト（深度約 750m からは基盤岩の砂岩・頁岩が分布）にて調査を実施した。Table 1 および Table 2 に主な機器の仕様および測定パラメータを示す。また、Fig.7 に使用機器の写真を示す。

Table 1. Specification of the acquisition systems.

MiniVib (Source: P- and S- wave)	Theoretical peak force	2,722kgf
	Holddown Weight	4500kgf
	Frequency range	10Hz ~ 550Hz
	Length	6.05m
	Width	2.29m
	Height	2.38m
Geologger3 (Data acquisition system)	Total weight	7,610kg
	System configuration	Borehole Shuttle acquisition module System controller
	Num. of channels	9 channels + 4 channel (analogue)
	Sample interval	0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0msec
	Num. of samples	29,000 samples
	A/D conversion	16bit sigma-delta
Borehole Shuttle (Borehole receiver system)	Preamplifier	1, 100, 1k, 10k
	Data format	SEG-2
	<Data transmission>	
	Num. of channels	9 channels
	Sample interval	0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0msec
	Num. of samples	29,000 samples
	A/D conversion	16bit sigma-delta
	Preamplifier	2, 200, 2k, 20k
	Diameter	50mm
	Weight	7.1kg
	<Receiver>	
	Receiver	3 component geophone (10Hz)
	Num. of receivers	3 receivers
	Maximum depth	1,500m
	Borehole diameter	66mm ~ 100mm
	Diameter	51mm
	Weight	1.4kg

Table 2. Field acquisition parameter.

	Hard rock site
Sweep range	10~60Hz (Linear sweep)
Sampling interval	0.5 msec
Sweep duration	6.0 sec
Recording time	8.0 sec
Source distance	4.0 m
Measurement range	0m ~ 340m
Measurement interval	2 m

	Soft rock site
Sweep range	10~60Hz (Linear sweep)
Sampling interval	1.0 msec
Sweep duration	14.0 sec
Recording time	16.0 sec
Source distance	9.0 m
Measurement range	500m ~ 1000m
Measurement interval	5 m



Fig.7. Field acquisition systems (Left: Minivib source, Middle: Borehole shuttle, Right: Winch).

PS 検層の手法を用いた Q 値測定は、主として P 波が発破もしくは重錘落下による方法、 S 波が板叩き振源による方法により調査が実施されてきた。本稿では、ミニバイブプレート振源 (S 波) を用いた調査事例とともに、硬岩サイトにて比較のために実施した板叩き振源 (S 波) を用いた調査事例を紹介する。

4.1 硬岩サイトにおける調査事例

硬岩サイトでは、深度 340m までの測定を実施した。調査地の地質は、地表～深度 13m が砂礫・礫混じり砂、深度 13m 以深が花崗岩で構成される。

Fig.8 に S 波収録記録および相対振幅分布を示す。相対振幅分布図より、深度ごとの振幅のばらつきが小さくかつ深度が深くなるにつれて振幅が減少しており、 S/N が良いことが確認できる。なお、相対振幅分布図の縦軸は、幾何補正前が測定深度を示し幾何補正後が伝播距離を示す。

Table 3 および Fig.9 に Fig.8 に示す記録から求めた Q 値を示す。図中の丸印は最大振幅法による Q 値、実線は振幅スペクトル法による Q 値、波線は振幅スペクトル法による減衰定数を示す。

解析で得られた Q 値は、室内試験から得られる一般的な火成岩の Q 値 (>100 程度) (Johnston et al., 1979) と比較して小さな傾向が得られた。この点に関しては、PS 検層の手法を用いた Q 値の解析では同一層内で散乱がないと仮定して Q 値 (Q_{int}) を求めているが、実際には調査地地盤が亀裂の卓越した岩盤であることに起因する散乱効果が含まれているものと解釈できる。

4.2 軟岩サイトにおける調査事例

軟岩サイトでは、深度 500m～1000m までの測定を実施した。調査地の地質は、深度 50m～深度 687m が砂岩・泥岩の互層構造主体、深度 687m～深度 742m が頁岩基質の角礫岩・礫岩主体、深度 742m 以深が砂岩・頁岩の互層構造主体で構成される。

Fig.10 に S 波収録記録および相対振幅分布を示す。相対振幅分布図より、硬岩サイトと同様に振幅のばらつきが小さくかつ深度が深くなるにつれて振幅が減少してお

り、 S/N が良いことが確認できる。また、深度 685m～740m の区間で減衰が大きくなることが確認できる。なお、相対振幅分布図の縦軸は、幾何補正前が測定深度を示し幾何補正後が伝播距離を示す。

Table 4 および Fig.11 に Fig.10 に示す記録から求めた Q 値を示す。図中の丸印は最大振幅法による Q 値、実線は振幅スペクトル法による Q 値、波線は振幅スペクトル法による減衰定数を示す。

深度 685m～745m 区間の Q 値は 6.9 と小さい結果が得られた。この区間は、ボアホールテレビュ記録等により亀裂が卓越していることが確認されており、硬岩サイトで得られた結果同様、亀裂に起因する散乱効果によるものと解釈できる。

4.3 硬岩サイトにおける板叩き振源を用いた調査事例

従来の PS 検層を用いた Q 値測定では、 S 波振源として板叩き振源を用いた調査が実施されてきた。そこで、板叩き振源を用いた調査とミニバイブプレート振源 (S 波) を用いた調査で得られる結果を比較することを目的とし、硬岩サイトにて板叩き振源を用いた調査を実施した。Fig.12 に板叩き振源の模式図および写真を示す。

Fig.13 に板叩き振源による S 波収録記録および相対振幅分布を示し、Fig.14 にミニバイブプレート振源と板叩き振源の測定で得られた相対振幅分布の比較および S 波速度分布を示す。相対振幅分布図より、深度ごとの振幅のばらつきが小さくかつ深度が深くなるにつれて振幅が減少しており、 S/N が良いことが確認できる。

Table 5 に板叩き振源を用いた調査で得られた Q 値とミニバイブプレート振源を用いた調査で得られた Q 値の比較を示す。調査結果より、両手法で求めた Q 値は概ね整合性が良いことが確認でき、ミニバイブプレート振源を用いた調査の有効性が示された。深度 150m～178m の区間で両手法の Q 値の傾向にやや相違が生じる傾向が見られた。この区間は S 波速度が大きく低下する領域に対応し、層厚が薄いことに加えてインピーダンスコントラストが大きいことが影響しているものと推測された。

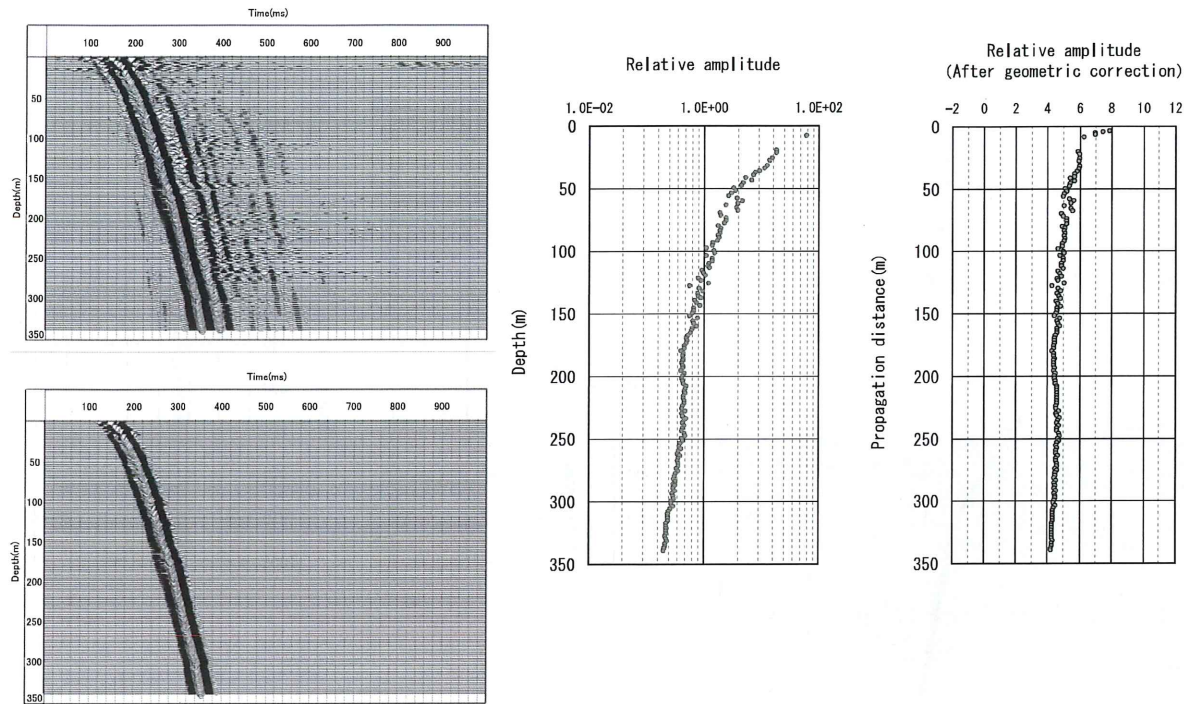


Fig.8. S-wave original data (left top), S-wave muted data (left down) and relative amplitude distribution calculated by maximum amplitude method (right).

Table 3. Q-value calculated by maximum amplitude method.

Depth(m)		S-wave velocity (m/s)	Peak freq.	Qs(h%)
0	32	640	26.8	6.8(7.4)
32	96	1480	23.7	7.9(6.3)
96	150	1820	24.4	10.4(4.8)
150	178	1680	24.7	9.1(5.5)
178	340	2160	24.6	30.9(1.6)

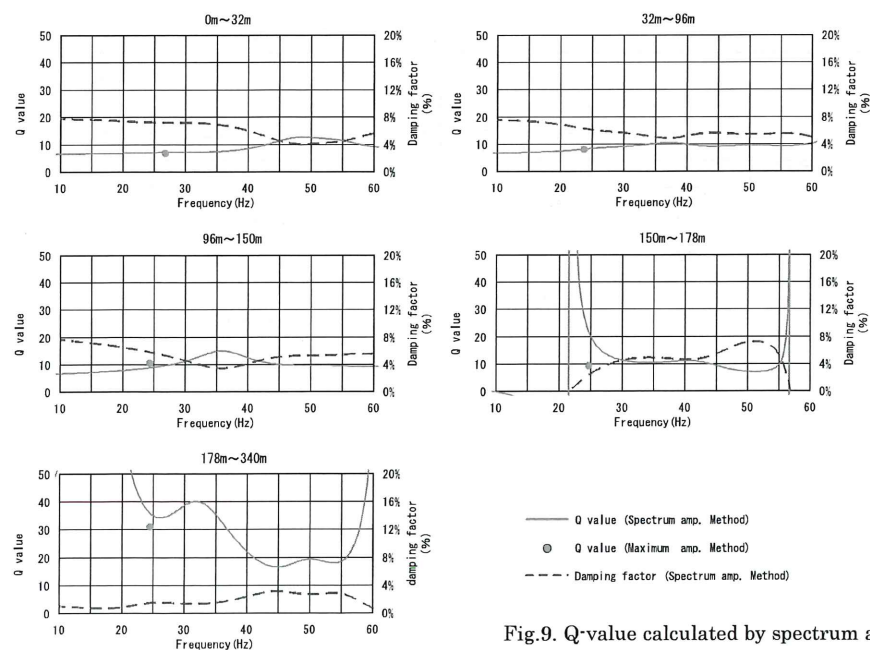


Fig.9. Q-value calculated by spectrum amplitude method.

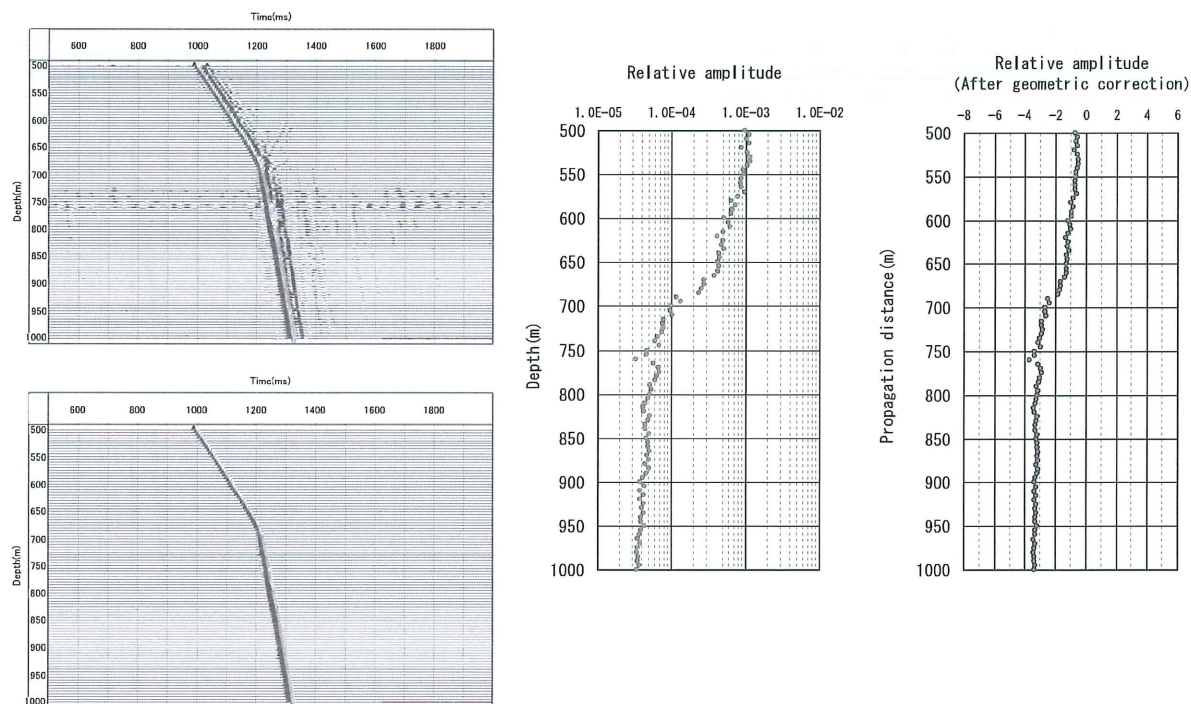


Fig.10. S-wave original data (left top), S-wave muted data (left down) and relative amplitude distribution calculated by maximum amplitude method (right).

Table 4. Q-value calculated by maximum amplitude method.

Depth(m)		S-wave velocity (m/s)	Peak freq.	Qs(h%)
500	685	850	34.5	20.3(2.5)
685	745	2650	32.8	6.9(7.3)
745	1000	2970	29.5	32.4(1.5)

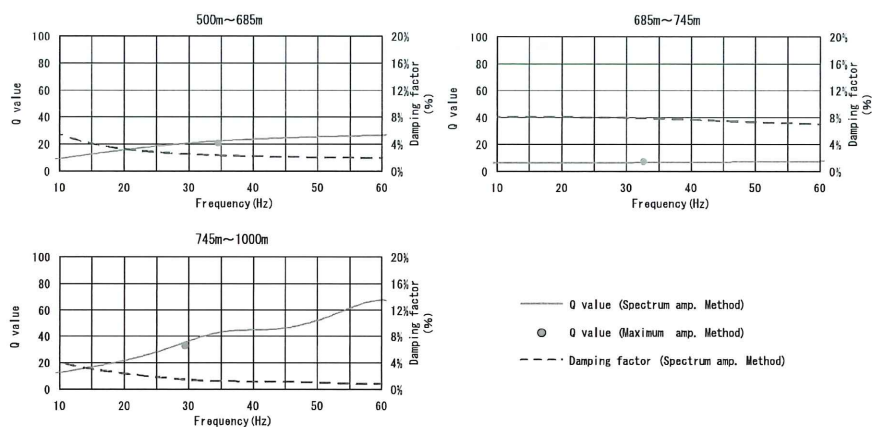


Fig.11. Q-value calculated by spectrum amplitude method.

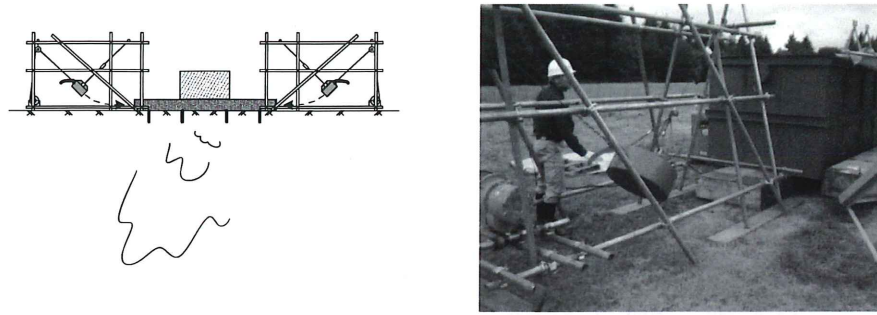


Fig.12. S-wave source (Plunk-hammering method).

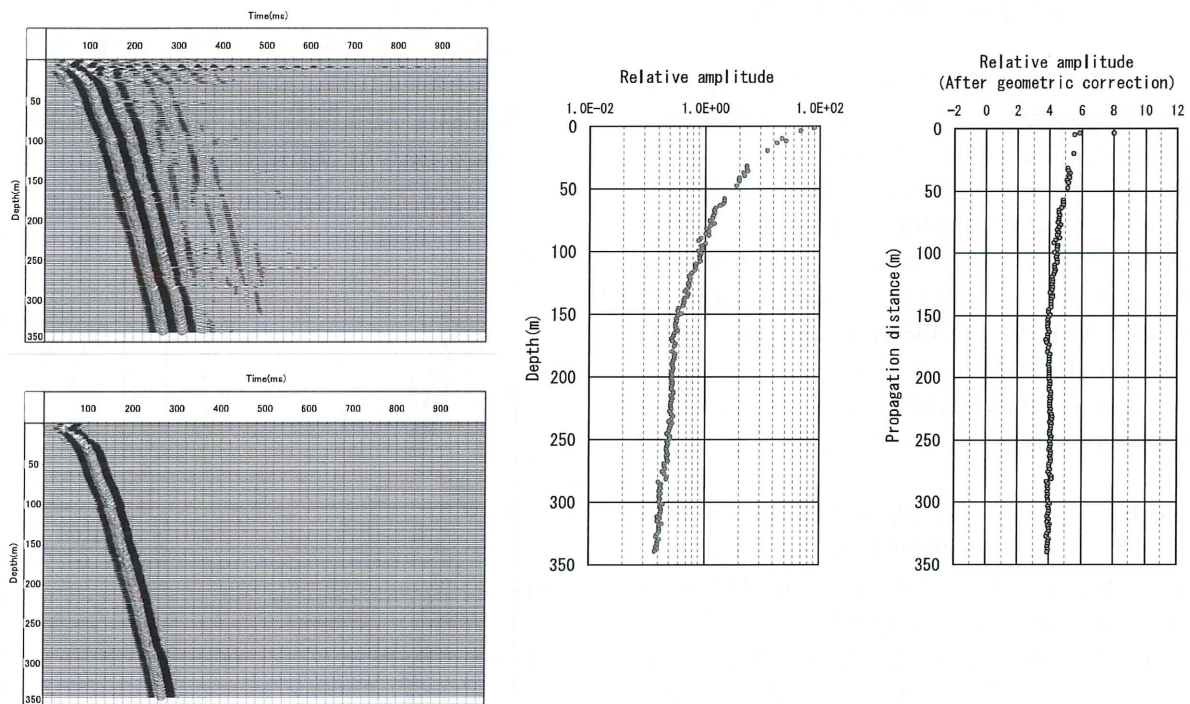


Fig.13. S-wave original data (left top), S-wave muted data (left down) and relative amplitude distribution calculated by maximum amplitude method (right).

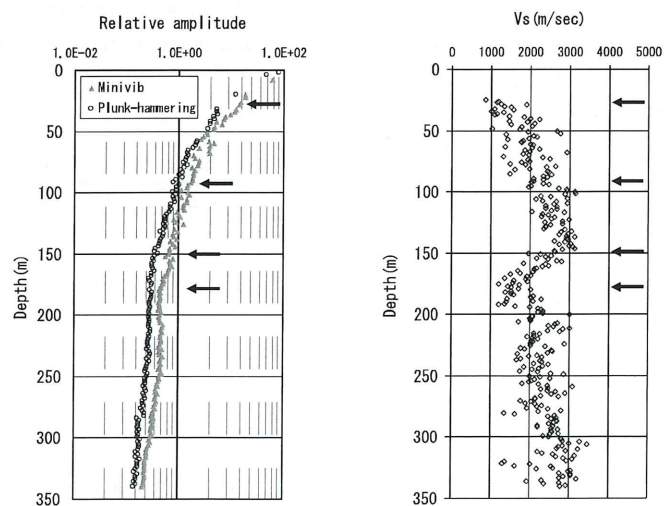


Fig.14. The relative amplitude distribution (left) and the result of Suspension PS-logging (right, S-wave).

Table 5. Q-value calculated by maximum amplitude method.

Depth(m)	S-wave velocity (m/s)	Minivib		Plunk-hammering	
		Peak freq.	Qs(h%)	Peak freq.	Qs(h%)
0	32	640	26.8	25.5	7.3(6.9)
32	96	1480	23.7	22.9	7.5(6.7)
96	150	1820	24.4	23.5	7.7(6.5)
150	178	1680	24.7	23.3	18.8(2.7)
178	340	2160	24.6	23.9	51.5(1.0)

5. 散乱減衰の影響に関する検討

調査事例で示した結果より、測定で得られた Q 値は伝播波の散乱の影響を受けて小さくなることが推測された。散乱減衰は、亀裂や薄層等による層内不均質に起因する速度の揺らぎにより地盤を伝播する弾性波が散乱する現象であり、一般に PS 検層の手法を用いた Q 値の解析では考慮されていない。しかしながら、実際の地盤は速度の揺らぎを有しており、散乱による減衰が含まれることが知られている（例えば、Richards and Menke, 1983 ; Maresh et al., 2006）。そこで、硬岩サイトで実施したサスペンション PS 検層記録を利用し、層内不均質に起因する弾性波の散乱が Q 値に与える影響について検討を行った。

Fig.15 にサスペンション PS 検層結果（S 波速度）およびサスペンション PS 検層結果から地盤を 1m, 2m, 5m の薄層にモデル化し、これらのモデルの境界面に弾性波が入射する際に得られる透過係数を示す。図中の矢印で示した最下層に着目すると、薄層の影響により透過係数が深度とともに低下している（散乱減衰している）ことが確認できる。PS 検層の手法を用いた Q 値の解析では、速度層区分を行い同一速度層内での Q 値を評価することにより散乱減衰の影響をできる限り低減している。しかしながら、同一速度層内であっても亀裂や薄層に起因する弾性波の散乱が起きるため、得られた Q 値は散乱減衰を含んだ値となり、岩石試料を用いた室内試験で得られる Q 値よりも小さくなる傾向にある。

Table 6 に各モデルから計算された透過係数を用いて散乱減衰の影響を補正し算出した Q 値を示す。表より、各モデルから計算された Q 値の相違が大きく、層内不均質に起因する弾性波の散乱の影響が大きいことが確認できた。ここで 1m の薄層モデルの Q 値が算出できない理由は、過補正による振幅傾向の逆転（深部ほど振幅が大きくなる）が挙げられた。伝播波の波長により Q 値に影響を及ぼす薄層の層厚が異なること、および内部減衰と散乱減衰を分離することが困難であることを考慮すると、地盤減衰特性の評価として内部減衰と散乱減衰を含む実質的な Q 値を評価することが妥当であると考えられる。

ここで、PS 検層の手法で発振される弾性波と自然地震では周波数が異なるため（PS 検層と比較して自然地震が低周波）、不均質地盤で起こる散乱減衰の傾向に相違が生じると推測される。したがって、PS 検層の手法により算出された Q 値を用いて自然地震に対する地盤応答を評価する際には注意が必要となる。

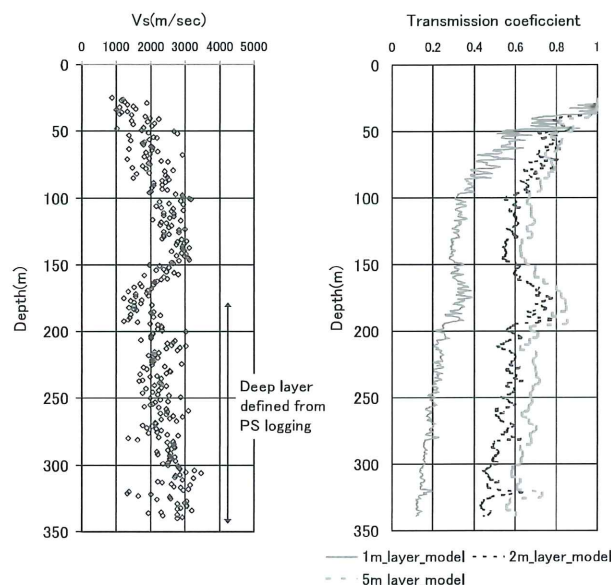


Fig.15. The result of Suspension PS-logging (left, S-wave) and the theoretical transmission coefficient (right).

Table 6. Effect of the Scattering attenuation.

Depth: 178m~340m	Qs
Homogeneous model (Results)	30.9
1m_model correction	-
2m_model correction	162.2
5m_model correction	91.1

6. まとめ

PS 検層の手法を用いた Q 値の評価について、弾性波の地盤減衰特性の概説、調査手法・解析原理の整理を行

い、これらの手法を用いて硬岩サイトおよび軟岩サイトで実施した調査事例を示した。PS 検層の手法を用いることにより、比較的浅部地盤の Q 値を精度良く求めることができることを示した。また、測定で得られる Q 値は内部減衰および散乱減衰の両者の効果を含む実質的な値であることを地盤モデルによる計算から示した。本稿で示した結果からも、PS 検層の手法を用いた Q 値調査は簡便かつ高精度に地盤減衰特性の評価が行える手法であると言え、その有用性が示された。今後、本手法の更なる高精度化を検討し、地盤減衰特性調査の高精度化を図りたい。

参 考 文 献

- Aki, K. and Richards, P.G. (2009) : Quantitative Seismology second edition, *University science book*, 161-176.
- 物理探査学会 (1998) : 物理探査ハンドブック 手法編, 753-754.
- Imai, T., Tonouchi, K., and Kanemori, T. (1980) : Evaluation of Q value using S-wave logging Records, *OYO Technical report*, **2**, 51-69.
- 今村杉夫・東宏幸・林宏一 (2002) : 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, 117-120.
- Johnston, D.H., Toksoz, M.N., and Timur, A. (1979) : Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks:II. Mechanisms, *Geophysics*, **44-4**, 691-711.
- 狐崎長琅 (1967) : 孔中固定式受震器による S 波の観測 (II) 孔中発破による SV 波の発震機構について, *物理探査*, **20-2**, 47-57.
- Lay, T., and Wallace, T.C. (1995) : *Modern Global Seismology*, Academic Press Inc. (レイ T., and ウォレス T.C., 柳谷俊 (訳) (2002) : 地震学, 古今書院, 149-161.)
- Meresh, J., White, R.S., Hobbs, R.W., and Smallwood, J.R. (2006) : Seismic attenuation of Atlantic margin basalts: Observations and modeling, *Geophysics*, **71-6**, B211-B221.
- 源栄正人・永野正行 (1996) : 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析 - 兵庫県南部地震における「震災の帯」の解釈 -, 日本建築学会構造系論文集, **488**, 39-48.
- Richards, P.G., and Menke, W. (1983) : The apparent attenuation of a scattering medium, *Bull. Seism. Soc. Am*, **73-4**, 1005-1021.
- Wang, Y. (2008) : *Seismic Inverse Q Filtering*, Blackwell Publishing, 3-5.
- 渡部哲史・諸井孝文・徳光亮一・西村功・土方勝一郎 (2011) : 褶曲構造を考慮した解析によるアスベリティ位置と地震動増幅特性の関連性の検討 - 柏崎刈羽原子力発電所における新潟県中越沖地震の観測記録に基づく評価 -, 日本建築学会構造系論文集, **659**, 71-78.

Evaluation technique of the ground attenuation property by using a PS-logging method

Dai Nobuoka *, Hiroyuki Azuma* and Masaaki Oba**

ABSTRACT

The evaluation of the attenuation property by using a PS-logging technique, which uses an artificial source, was reported based on the case studies. The main benefits of this method are that it is a convenient, cost effective, and highly accurate system. An artificial source is set at the surface that generates seismic waves. These waves are then recorded by the borehole receivers, which were installed in the borehole with high density. The recorded signals are analyzed and the attenuation properties of each velocity layer are calculated in detail. This method can also evaluate attenuation properties as a function of frequencies. After showing an overview of the characteristics of the attenuation properties and the analysis method of using the PS-logging technique, we then show the case studies of the Q-value investigation, which are implemented at a hard rock and soft rock site. In these case studies, we showed results which were conducted by using a Vibrator as the source. The results of the investigation show that we can acquire data with high S/N and can evaluate the attenuation properties of each velocity layer in detail. We also showed that the Q-value, which was acquired using the PS-logging technique, contains the effect of wave scattering caused by fractures in the rock. Evaluating attenuation properties through the PS-logging technique is useful in obtaining attenuation property in detail.

Keywords: attenuation property, Q-value, PS-logging, vibrator source