

鉛直アレー観測記録より同定した Q 値の 周波数依存性に関する一考察

服部 哲¹・西川 啓二²・沢田 勉³・平尾 潔⁴

¹ 学生員 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

² 学生員 神戸大学大学院 自然科学研究科 (〒657 神戸市灘区六甲台 1-1)

³ 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

⁴ フェロー 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

従来より地盤の減衰を表す Q 値には、周波数にほぼ比例して増加する傾向のあることが指摘されてきた。しかし、観測記録を用いた Q 値の同定において、従来の Q 値の周波数依存性モデルを用いた場合、 Q 値の周波数依存性を明確に確認できないことがある。そこで本研究では、ひずみ振幅と Q 値の関係に着目した周波数依存性を表す新しいモデルを設定し、国内の 4 カ所の観測点で得られた鉛直アレー観測記録を用いて Q 値を同定し、同定結果より Q 値の周波数依存性を検討する。

Key Words : vertical array record, quality factor, frequency dependency, identification

1. はじめに

近年、多くの研究機関で鉛直アレー観測記録から地震時における地盤の動特性値 (S 波速度および Q 値) を同定しようとする研究が行われている。特に地盤の減衰を表す Q 値には、周波数依存性のあることが指摘されており、これを考慮した地盤の同定が行われてきた。しかし、従来の Q 値の周波数依存性モデルを用いた解析では、同定結果のばらつきが大きく、明確な形で Q 値の周波数依存性を確認できないのが現状である。

本研究では、 Q 値の周波数依存性モデルを新たに設定し、その特性を同定手法に組み込むことによって、地震時における実地盤の S 波速度および Q 値を精度よく同定する。そして得られた結果より、 Q 値の周波数依存性の検討を行う。

2. 同定手法の定式化

一般に、比較的深い震源の近距離地震による地盤震動の強震部では S 波が卓越し、その震央直角成分は SH 波であると考えられる。本研究では、実地盤を図-1 に示すような水平成層構造で近似し、鉛直下方より SH 波が入射するという仮定のもとに、地中 2 点 (p 点、 q 点) で得られた鉛直アレー観測記録よ

り、 q 点より以浅の地盤の S 波速度と Q 値を同定する問題を考える。層厚 H_m および土の密度 ρ_m は事前の地盤調査等によって比較的精度よく推定されているため既知とする。

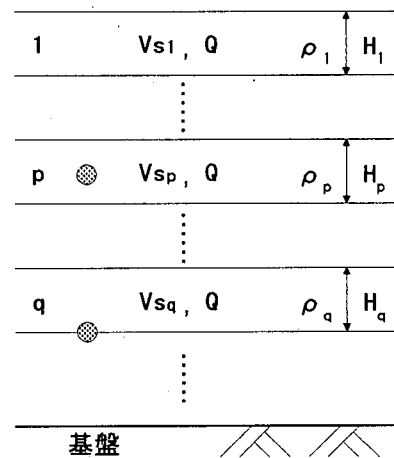


図-1 水平成層地盤モデル

いま、図-1 に示すような水平成層地盤において、層番号を上から順に $1, 2, \dots, p, \dots, q$ とする。そしてこの地盤の p 層の任意点 (p 点) および q 層の下面 (q 点) の 2 点において同時観測記録が得られているものとする。 p 点、 q 点で得られた観測記録の複素フーリエスペクトルをそれぞれ $F_{po}(f)$ 、 $F_{qo}(f)$ とすると、重複反射理論¹⁾と Q 値の周波数依存性のモデル ((6) 式) より、 p 点での複素フーリエスペクト

ル $F_p(f:\alpha)$ を求めることができる。ここで、 α は同定すべきパラメータを一般的に表したものであり、具体的には地盤各層の S 波速度 V_{sm} ($m=1, 2, \dots, p, \dots, q$) と後述する Q 値を決定するパラメータ Q_0, a, f_l, b, f_u からなる。

$$\alpha = \{V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sq}, Q_0, a, f_l, b, f_u\}^T \quad (1)$$

つぎに、 $F_{po}(f)$ 、 $F_{qo}(f)$ より求めた周波数応答倍率 $A_o(f)$ と、 $F_p(f:\alpha)$ 、 $F_{qo}(f)$ より求めた周波数応答倍率 $A(f:\alpha)$ を以下の(2)式、(3)式のように求めるが、 $F_{po}(f)$ 、 $F_{qo}(f)$ 、 $F_p(f:\alpha)$ にはすべて平滑化を施し、観測記録に含まれる種々の原因によるノイズの影響を低減する。

$$A_o(f) = \frac{|\tilde{F}_{po}(f)|}{|\tilde{F}_{qo}(f)|} \quad (2)$$

$$A(f:\alpha) = \frac{|\tilde{F}_p(f:\alpha)|}{|\tilde{F}_{qo}(f)|} \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{F}_{po}(f)$ 、 $\tilde{F}_{qo}(f)$ 、 $\tilde{F}_p(f:\alpha)$ は平滑化を施したフーリエスペクトルである。

以上で述べた周波数応答倍率を用いて、未知パラメータ α を同定するために(4)式のような評価関数を設定する。

$$Se(\alpha) = \sum_{i=1}^{N_f} \{A(f_i:\alpha) - A_o(f_i)\}^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

ここで、 f_i 、 N_f はそれぞれ対象とする周波数領域を分割したときの i 番目の振動数点と、その分割の総数である。評価関数は 2 種類の周波数応答倍率の残差平方和を最小にするものであり、 $Se(\alpha)$ が最小値を取るとき、つまり、目標とする $A_o(f)$ に最も適合した $A(f:\alpha)$ が得られたときの α を同定値として採用する。

3. Q 値の周波数依存性

Q 値の周波数依存性については従来より種々の検討がなされ、Q 値が周波数にほぼ比例して増加するという説が支配的となっている。また、Q 値は高周波数領域で上限を持つことも指摘されている。さらに Q 値と周波数の関係を深く考えるならば、低周波数領域あるいは中周波数領域において Q 値に下限が存在するの考えるのが自然である。しかし、従来の研究では(5)式に代表されるような Q 値のモデルを用いているため、Q 値の上限あるいは下限を考慮できず、Q 値の同定結果に大きなばらつきが見られる。

$$Q = Q_0 \cdot f^n \quad (5)$$

ここで、 Q_0 は $f=1\text{Hz}$ のときの Q 値、 f は周波数、 n は正の定数で 1 前後の値といわれている。本研究の特徴は、この問題点に対して、新しい Q 値のモデルを提案し、このモデルを組み込んだ同定手法により、実地盤における Q 値の特性を明らかにしようとするところにある。

杉戸らは²⁾、減衰定数をひずみ振幅が小さい高周波数領域および低周波数領域では小さく、ひずみ振幅が大きい中周波数領域では大きく評価し、これを用いた地震応答解析を行い良好な結果を得た。本研究では、これを参考としてモデルを改良することとした。Q 値は減衰定数とほぼ逆数の関係にあるため、高周波数領域および低周波数領域では Q 値を大きく、中周波数領域では Q 値を小さくする(6)式のようなモデルを設定する。なお、(6)式を周波数領域で描けば図-2 のようになる。

$$Q = Q_0 \cdot \left[\frac{1}{1 + \exp\{a \cdot (f - f_l)\}} + \frac{1}{1 + \exp\{-b \cdot (f - f_u)\}} \right] \quad (6)$$

ここで、 f は周波数、 Q_0 、 a 、 f_l 、 b 、 f_u は Q 値を決定するパラメータである。なお、本研究では、全層を一律とした Q 値を想定しており、これらのパラメータを求めることで全層一律の Q 値を同定する。

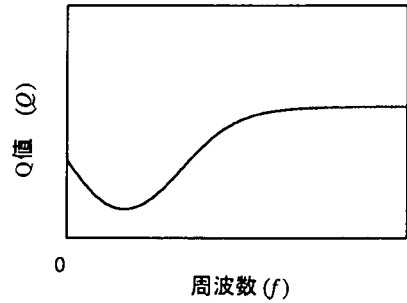


図-2 Q 値の周波数依存性モデル

4. 同定結果

実地盤における Q 値の周波数依存性の検討では、実地震動記録が豊富でかつ地盤構造が詳細に調査されている観測点が望ましい。本研究では、参考文献 3) の強震動アレー観測記録データベースに収録されている記録のうち、下鶴間観測点（西松建設技術研究所）、東京大学生産技術研究所（千葉実験所構内観測点）、越中島観測点（清水建設技術研究所）、電力共通研究における富岡観測点の 4 地点で得られた鉛直アレー観測記録それぞれ 4 組の合計 16 組を用いることとした。各観測点では多数の地震記録が得られているがマグニチュードが比較的大きく、震央

距離に対して震源深さが大きい記録を選択した。また、観測記録は地震計の埋設方位の補正⁴⁾を行った後、Transverse 成分に変換して用いた。本報告では、紙面の都合もあり、またQ値の周波数依存性を検討するという目的から、S波速度の同定結果については下鶴間観測点(図-3)1地点のみを示し、Q値の同定結果については4地点すべて(図-4、図-5、図-6、図-7)を示すことにする。図-3は縦軸が地盤の深さを示し、横軸がS波速度を示している。図中の破線はPS検層の結果であり、今回の同定結果に対する目安となる。図-4、図-5、図-6、図-7は縦軸がQ値を示し、横軸が周波数を示している。

(1) 下鶴間観測点(図-3および図-4)

下鶴間観測点では、地中100mから地表までの地盤を4層の水平成層地盤でモデル化し同定を行った。

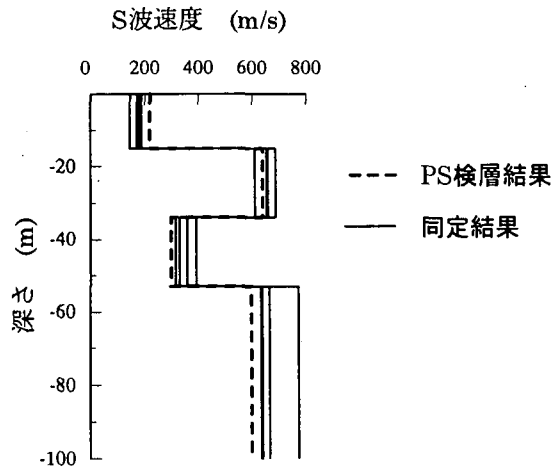


図-3 S波速度の同定結果(下鶴間観測点)

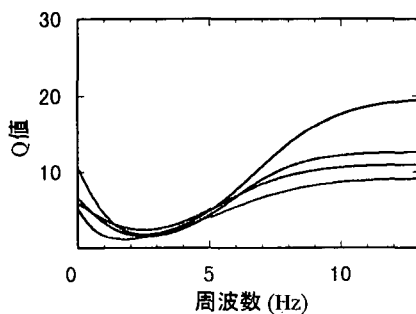


図-4 Q値の同定結果(下鶴間観測点)

図-3のS波速度の同定結果は、第4層においてPS検層値よりも大きめに同定されているが概ね安定した結果が得られている。図-4のQ値の同定結果は、高周波数領域での上限には多少ばらつきが見られるものの、中周波数領域における下限はすべての結果においてほぼ等しく同定されており、Q値の周

波数依存性が明確に見受けられる。

(2) 千葉実験所(図-5)

千葉実験所では、地中40mから地表までの地盤を3層の水平成層地盤でモデル化し同定を行った。図-5にQ値の同定結果を示す。

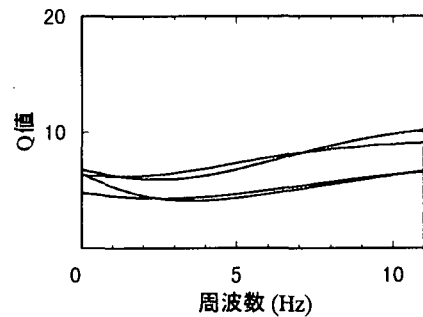


図-5 Q値の同定結果(千葉実験所)

この地盤では、Q値を決定するパラメータの同定値はほとんどばらつきが見られず、安定した結果が得られた。しかし、図-5に示すように、この地盤のQ値は、上限・下限が明確に現れず、周波数依存性が検出されなかった。

(3) 越中島観測点(図-6)

越中島観測点では、地中100mから地表までの地盤を3層の水平成層地盤でモデル化し同定を行った。図-6にQ値の同定結果を示す。

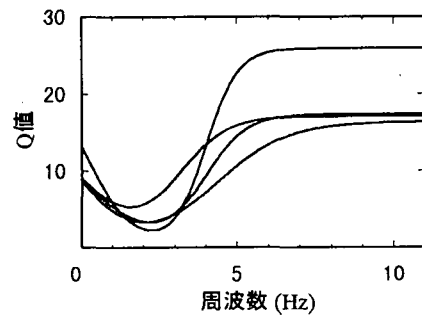


図-6 Q値の同定結果(越中島観測点)

この地盤では、記録によって多少の違いは見られるものの、下鶴間観測点と同様にQ値の周波数依存性が明確に確認された。

(4) 富岡観測点(図-7)

富岡観測点では、地中100mから地表までの地盤を3層の水平成層地盤でモデル化し同定を行った。図-7にQ値の同定結果を示す。

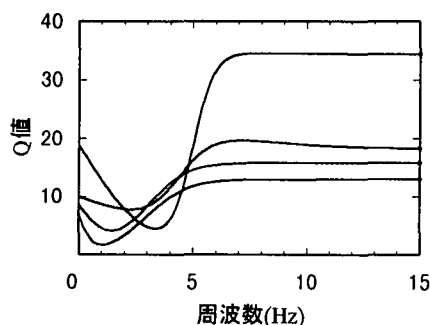


図-7 Q値の同定結果（富岡観測点）

この地盤では、他の観測点の結果に比べればばらつきをとまなっているものの、Q値の周波数依存性が確認できたと思われる。

5. まとめ

本研究では、地盤の減衰を表すQ値の周波数依存性（6式）を同定手法に組み込み、鉛直アレー観測記録を用いてS波速度およびQ値を決定するパラメータ Q_0 , a , f_l , b , f_u を同定し、Q値の周波数依存性を検討した。結果を要約すると次のようになる。

- ① S波速度の同定結果は下鶴間観測点のみを示したが、その他の3地点においても記録ごとに多少のばらつきが見られるものの、比較的安定した結果が得られた。
- ② Q値の周波数依存性は下鶴間観測点をはじめ越中島観測点、富岡観測点の各地盤で検出された。これらの地盤のQ値は2~4Hzの中周波数領域で

極小値を取ることが多く、高周波数領域においても上限値が明確に現れた。これに対して、千葉実験所の地盤では明確な周波数依存性が確認できなかった。

今後は、その他の地盤に対しても本手法による同定を行い、計算数を増やすとともに、明確な周波数依存性を確認できなかった千葉実験所の地盤等に対して、さらなる検討を行っていく必要があると思われる。

謝辞：本研究で使用した鉛直アレー観測記録は、西松建設技術研究所（下鶴間観測点）、東京大学生産技術研究所（千葉実験所）、清水建設技術研究所（越中島観測点）、電力共通研究における富岡観測点で得られた記録を（財）震災予防協会が強振動アレー観測記録データベースとして収録したものである。記して関係者の方々に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土岐憲三：新体系土木工学 11 構造物の耐震解析，技報堂，pp. 80-91，1982.
- 2) 杉戸真太，合田尚義，増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察，土木学会論文集，No. 493/Ⅲ-27，pp. 49-58，1994.
- 3) （財）震災予防協会：強震動アレー観測記録データベース，No. 1，1993，No. 2，1995.
- 4) 山崎文雄：アレー観測記録による地震計設置誤差の評価，土木学会論文集，No. 432/Ⅰ-16，pp. 231-240，1992.

A study on the frequency dependency of quality factor identified by vertical array records.

Satoshi HATTORI, Keiji NISHIKAWA, Tsutomu SAWADA and Kiyoshi HIRAO

This study deals with identification problem of shear wave velocity and quality factor formulated in the frequency domain on the basis of multiple reflection and refraction method. The objective of this study is to evaluate the frequency dependency of the quality factor in subsurface layers of real ground, by using vertical array records of earthquake ground motions. The new model of frequency dependency of quality factor has been presented in this study. The frequency dependency of quality factor is detected from numerical analysis, by using the vertical array records at Shimoturuma, Chiba, Ettyuujima, and Tomioka sites.