

鉛直アレー観測記録を用いた地盤の減衰特性 推定のためのスイープ法の提案

辻原 治1・澤田 勉2

¹和歌山工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島77) E-mail:tsujihara@wakayama-nct.ac.jp ²徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1) E-mail: sawada@ce.tokushima-u.ac.jp

神戸市を中心に大きな被害をもたらした1995年の兵庫県南部地震以来,我が国では多くの地震計が設置 されるようになった.防災科学技術研究所のKiK-netにおいては,全国の約700箇所の地点で,地表および 地中の地盤震動の同時観測が実施されており,その記録は地盤の動特性の同定などに用いられている.本 研究では,地盤の動特性のうち特に減衰に着目し,これを同定するための新たなアプローチを提案すると ともに,その課題について議論する.

Key Words : vertical array of seismometers, KiK-net, quality factor, identification, sweeping method

1. はじめに

地表および地中の地震動特性は、震源機構、伝播経路、 サイト特性などの影響を受ける.とくに表層地盤の応答 特性は地震動に複雑な影響を及ぼすため、地震時地盤の 動特性を明らかにすることは耐震設計や被害予測の上で きわめて重要である.

地盤の動特性は、従来、弾性波探査、PS検層や常時 微動観測などから推定されている.しかし、そのような 方法で推定される地盤の動特性は地震時のそれと必ずし も対応するものではない.原位置における土の拘束条件 などを実験室で再現するのは困難であり、やはり実地震 時の土の挙動を観測し、これより動特性を同定するのが 最も合理的である.

近年,地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた地盤同 定が行われるようになった^{たとえば1~6}.これまでに,この ような地盤同定を行う方法がいくつか提案されている. 水平成層地盤構造を仮定した場合に*S*波速度の構造を推 定することについては一定の成果を上げているものの, 減衰を表す *Q* 値(あるいは減衰定数)の推定について は,その精度向上が課題となっている.

1995年兵庫県南部地震の発生以来,地震計の普及とあいまって,地盤震動記録が多く得られるようになった.

とくに,独立行政法人防災科学技術研究所の基盤強震観 測網(KiK-net)⁷では,地表と地中における地震動の鉛直 アレー観測が実施されている.およそ700の観測サイト を有しており,これまでに膨大なデータが蓄積されてい る.これらのデータを元に地盤の動特性値を同定し,そ の結果を蓄積・整理して総合的に評価することが,*Q*値 を含めた地震時地盤の動特性の解明につながると考えら れる.

地盤の同定問題においては一般に、水平成層地盤にお けるS波の一次元重複反射を仮定し、各層のS波速度が同 定される. Q値については、層ごとに同定するのは精度 の観点から困難であり、全層一律として同定されること が多い. また、Q値が周波数に依存するという見方が大 勢であり、Q値のモデルを仮定し、そのモデルパラメー タを同定する研究も行われているが、未だ解決には至っ ていない.

本研究は、予めQ値のモデルを仮定せず、周波数ごとのQ値を推定し、そこからQ値のモデル化を目指すことを念頭に置いている.本稿では、評価関数に対するQ値の感度を利用したスイープ法を提案し、KiK-netの観測点への適用結果とその評価および課題について議論する.

図-1 に示すような水平成層構造をもつ地盤に鉛直下 方から SH 波が入射するものとし、地表または地中で得 られた鉛直アレー観測記録より,地盤各層の S 波速度 Vmと Q値 Qmを同定する問題を考える. 地盤各層の層厚 H_m および土の密度 ρ_m は既知と仮定する.

いま, 第 *p* 層内の点 *p* および第 *q* 層底面の点 *q* (p<q)で、地盤震動加速度の同時観測記録が得られて いるものとし、これらの記録のフーリエスペクトルをそ れぞれ Y_p(ω), Y_d(ω)とする. 鉛直下方から入射した円振 動数ωのSH波の重複反射を仮定すると、それらと地表 面加速度のフーリエ振幅 Y_α(ω)との間にはつぎの関係が 成り立つ⁸⁾.

$$Y_{p}(\omega) = \gamma_{p}(\omega; \boldsymbol{\alpha}) Y_{o}(\omega)$$
(1)

$$Y_{q}(\omega) = \gamma_{q}(\omega; \boldsymbol{\alpha}) Y_{o}(\omega)$$
⁽²⁾

ここに、 $a(=\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_N)$ は同定すべき未知変数 V_i , Q_i , j=1,2,・・・,q を一般的に表し, N(=2q)は未知変数の総数を 表す.また、y₀(ω;a)、y₂(ω;a)は地表面に対する加速度スペ クトル振幅の低減率であり、つぎに示す 2×2 の行列 [R,] と[R]の第1行第1列の係数である.

$$[R_p] = [T_p][S_{p-1}]\cdots[S_1]$$
(3)

$$[R_{q}] = [S_{q}][S_{q-1}]\cdots[S_{1}]$$
(4)

上式に含まれる行列[Smlは, 第 m 層において上下の境界 面の加速度およびひずみの関係を表す 2×2 の行列で、そ の係数は次式で与えられる.

$$\begin{cases} S_{m \cdot 11} = [\exp(ia_m \omega) + \exp(-ia_m \omega)]/2 \\ S_{m \cdot 12} = [\exp(ia_m \omega) - \exp(-ia_m \omega)]/(2ib_m \omega) \\ S_{m \cdot 21} = ib_m \omega [\exp(ia_m \omega) - \exp(-ia_m \omega)]/2 \\ S_{m \cdot 22} = S_{m \cdot 11} \end{cases}$$
(5)

ここに, $i(=\sqrt{-1})$ は虚数単位であり, a_m と b_m は次式で表 ここに, される.

$$a_{m} = H_{m} / (V_{m} \sqrt{1 + i/Q_{m}})$$
(6)

$$b_m = \rho_m V_m \sqrt{1 + i/Q_m} \tag{7}$$

	•; Sensor
1	H_1 ρ_1, V_1, Q_1
2	H_2 ρ_2, V_2, Q_2
p	$H_p \bullet \mathcal{L}_p p_p, v_p, \mathcal{Q}_p$
q	μ ρ_a, V_a, Q_a
1	

q+1

図-1 解析モデルとセンサーの配置

式(3)の右辺第一項の[T]は式(5)で定義される行列[S]にお いて、H_pのかわりに第 p 層の上面に座標軸の原点を定め た層内任意点の鉛直座標 Z を代入したものである. Z=0 の場合は、[T_]=[], すなわちは[T_]単位行列にとなる.式 (1)と(2)の比をとると,

$$\widetilde{U}_{pq}(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\alpha}) = \gamma_{p}(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\alpha}) / \gamma_{q}(\boldsymbol{\omega},\boldsymbol{\alpha})$$
(8)

が得られる. これは点 qの振動に対する点 pのそれの倍 率を表しており、一種の周波数伝達関数である.

地盤同定問題は、次式を評価関数とする最適化問題と して表すことができる.

$$S(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{j=1}^{N} \left\{ \widetilde{U}_{pq}(\boldsymbol{\omega}_{j}, \boldsymbol{\alpha}) - Y_{p}(\boldsymbol{\omega}_{j}) / Y_{q}(\boldsymbol{\omega}_{j}) \right\}^{2} \rightarrow \min$$
(9)

ここに、ωiは離散円振動数点を表し、N はその総数であ る. また,式(10)を評価関数として用いることも考えら れる.

$$S(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{j=1}^{N} \left\{ \widetilde{Y}_{p}(\boldsymbol{\omega}_{j}, \boldsymbol{\alpha}) - Y_{p}(\boldsymbol{\omega}_{j}) \right\}^{2} \rightarrow \min$$
(10)

$$\widetilde{Y}_{p}(\boldsymbol{\omega}_{j},\boldsymbol{\alpha}) = \widetilde{U}_{pq}(\boldsymbol{\omega}_{j},\boldsymbol{\alpha})Y_{q}(\boldsymbol{\omega}_{j})$$
(11)

式(9)あるいは(10)の最適化問題は改良 SLP 法 ⁹よって 解かれる.

地盤同定問題における未知変数の推定精度は,式(8) に示す周波数伝達関数に対するそれぞれの未知変数の感 度と深く関わっている.このことについて,図を用いて 以下に説明する.

図-2に示す層厚15mの表層地盤の周波数伝達関数を 図-3に示す.また、S波速度とO値の周波数伝達関数に 対する感度も同図に示している.S波速度の感度の特徴 は、周波数伝達関数のピーク周波数でその符号が変わる ことである. ピーク周波数を境に低周波数から高周波数 にむけてマイナスからプラスに変化している. これは, S波速度の変化によって周波数伝達関数のピークの位置 が変わることを意味している.すなわち、S波速度が大 きくなるとピーク周波数が高周波数側に移動することを 表している. このようにピーク周波数が変化すると、式 (9)あるいは式(10)の評価関数に及ぼす影響は大きくなる ため、S波速度については比較的精度良く推定できる. 一方, Q値の感度については、周波数伝達関数のピーク の周辺で有意な感度を持つが、符号はプラスである. こ のことは、Q値が大きくなると周波数伝達関数のピーク のレベルが上がることを意味している.

ここで、注目するべきは、S波速度とO値はともに、 周波数伝達関数のピーク付近以外は、その感度が零に近 い値になっていることである. 観測記録のフーリエスペ クトルあるいはフーリエスペクトル比と解析モデルのそ れとは、観測記録に含まれるノイズやモデル誤差などに より、完全に一致することはない、両者の残差を最小に するべく,モデルのS波速度およびO値が更新されてい く. しかし、それらの値が変化しても、感度の低い周 波数帯では周波数伝達関数にほとんど反映されない. し たがって、そのような周波数帯においては、Q値の周波 数依存性を適切に評価することは大変難しいということ を認識しておく必要がある. 0値の周波数依存性を表す モデル(関数)もいくつか提案されているが,式(9)あ るいは(10)のような評価関数を用いた場合、感度の低い 周波数帯で、*Q*値が非常に大きくまたは小さく見積もら れる可能性があり、このことがQ値の周波数依存性を表 すモデルのパラメータの推定に影響を及ぼすと考えられ る.

Q値の周波数依存性を同定するためには、予めこれを 表すモデル(関数)を仮定せず、周波数点ごとの値を推 定することも考えられる.しかし、前述のとおり、ノイ ズなどの問題があり、このような方法はあまり採用され ない.本研究では、Q値の感度を利用し、感度の低い周 波数帯については、設定した範囲の外に掃き出してしま うスイープ法を提案する.これは、S波速度が適切に同

$$\rho = 15.68 kN / m^{3}$$

$$V_{s} = 150m / \sec \qquad Q = 10$$





定されているにもかかわらず,Q値の感度の低い周波数 点で観測記録のフーリエスペクトルあるいはフーリエス ペクトル比と解析モデルのそれに残差がある場合,これ を小さくするようにQ値が更新されるが,感度が極端に 小さいため,Q値が更新されても残差にほとんど変化が なく,繰り返し計算の後,Q値は設定された範囲を超え てしまうという考えに基づいている.このような作業を それぞれの周波数点について行えば,設定された範囲内 で推定されたQ値は信頼度が高いと考えられる.

地盤同定にスイープ法を適用する場合の具体的な手順 について以下に述べる.同定は二段階で行う.第一段階 では,各層のS波速度と周波数に依存しない型のQ値を 未知変数として,式(9)あるいは式(10)を用いて同定を行 う.第二段階では,第一段階で推定されたS波速度を固 定し,また推定されたQ値を初期値として,周波数点ご とに観測記録のフーリエスペクトルあるいはフーリエス ペクトル比と解析モデルのそれとの残差が小さくなるよ うに繰り返しQ値を更新する.

4. スイープ法のKiK-netへの適用

1997年以降,東北地方で発生したM6.0以上の地震の中から表-1に示す2つを選び,最深部のセンサーの深さが100mでかつ最大加速度が100gal以下のサイトのうち, 表-2に示す7サイトで得られた地盤震動記録を利用し, 当該サイトの地盤同定を行った. 表-1 地震の諸元

Event No.	Date	Latitude	Longitude	Depth(km)	Magnitude
1	2003/7/26	38.402	141.173	12	6.2
2	2005/8/16	38.147	142.282	42	7.2

表-2 KiK-net 観測点の経緯度

No.	Site Code	Site Name	Latitude	Longitude
1	IWTH06	NINOHE-W	40.2583	141.1744
2	IWTH08	KUJI-N	40.2658	141.7867
3	IWTH10	ASHIRO	40.1364	140.9564
4	IWTH12	KUNOHE	40.1506	141.4281
5	AKTH06	OGACHI	38.9772	140.4986
6	YMTH04	KAMINOYAMA	38.0783	140.3011
7	YMTH15	NSHIKAWA-E	38.4228	140.1283





これらの7サイトのうち,そのコードが**IWTH08**のサイトについて,イベント1の地震の際に観測された記録を用いて同定した結果について例示する.

地表と地中の加速度記録を図-4の(a)と(b)に示す.それ ぞれ東西および南北方向成分を震央直角方向に合成して いおり,地中の記録については予め,報告されている埋 設方位ずれの補正を施している.図-4の(c)と(d)は,同図 の(a)と(b)の主要動とみなされる区間を切り取って時間軸 の方向に引き延ばしたものであり,これらを同定に用い る.同サイトのPS検層による層厚,S波速度およびP波 速度の推定値ⁿを表-3に示す.図-5に第一段階の同定に よって推定されたS波速度とQ値を示す.図には,それ ぞれの初期値と推定値の分布を示している.S波速度の 初期値はPS検層による推定値とし、Q値は10とした. 土の密度については報告されていないため、次式¹⁰により近似することとした.

$$\rho_i = 0.31 V_{p_i}^{1/4} \tag{12}$$

ここに、*V_p*は第*i*層の*P*波速度を表す.評価関数は、スペクトルの平滑化の影響を受けない式(10)を用いている. 第二段階の同定では、*S*波速度を第一段階で推定された値に固定し、周波数点ごとに*Q*値を同定する.このとき、*Q*値の上下限値はそれぞれ80と3にしたが、これは同定の際の繰り返し計算の回数と、一回の計算で更新される

No.	Thickness (m)	S-wave Velocity (m/sec)	P-wave Velocity (m/sec)
1	4.0	150.0	360.0
2	6.0	280.0	600.0
3	10.0	280.0	2150.0
4	14.0	680.0	3000.0
5	16.0	900.0	3000.0
6	50.0	2120.0	3680.0

表-3 ボーリングおよび PS 検層によって推定された WTH08 の地盤構造



図-5 S波速度と Q値の初期値と第一段階の同定で得られた推定値



図-6 観測記録と解析モデルの地表におけるフーリエスペクトル

*Q*値の増分量によって適宜変更が可能である. 図-6には 解析モデルについて,同定すべきパラメータの初期値, 第一段階の推定値および第二段階の推定値に対する地表 のフーリエスペクトルの計算値を観測記録のそれと比較



図-7 第二段階の同定で推定された Q 値と同定された地 盤モデルの周波数伝達関数に対する Q 値の感度(イ ベント1の地震記録を用いた場合)

して、それぞれ(a)、(b)および(c)に示す.図-7に、第二段 階で推定された周波数点ごとのQ値をプロットしている. また、同図には同定された地盤モデルの周波数伝達関数 に対するQ値の感度解析の結果も示している.図には掃 き出されたQ値を明示するために、上限値あるいは下限 値に収束したものとして表している.ねらいどおりに、 感度の低い周波数帯のQ値がほぼ掃き出されていること がわかる.同定されたQ値は、周波数伝達関数の最も低 いピーク周波数付近で比較的大きな値を持っているが、 それを除けば周波数とともに大きくなる傾向が現れてい る.しかし、感度のピーク周波数付近で複数の推定値が 得られており、これをどのように評価するのかについて の課題が残る.

つぎに、同じサイトIWTH08においてイベント2の地震を用い、同様の手続きを経て同定を行った結果について、 *Q*値の推定値のみ図-8に示す.イベント2を用いても、*Q* 値が周波数とともに大きくなる傾向が現れており、図-7 と比較しても矛盾はない.

図-9にIWTH08以外の6つのサイトについて、それぞれ イベント1および2を用い、スイープ法によって同定され たQ値を示す.どのサイトでもQ値が設定された上限値 あるいは下限値の外側に掃き出されている周波数点が少 なくない.上下限の間で得られているQ値の推定値は、 概して高周波になるほど大きくなる傾向が伺え、従来か ら指摘されているQ値の周波数依存性と矛盾するもので はない.同一のサイトにおいて、異なる地震による記録 を用いて同定を行った結果を比較すると、類似性が認め られる.一方、それぞれの同定結果を見ると隣接する周 波数点でもQ値の推定値が大きく異なっている等、物理 的な説明が困難な結果が得られいることも事実である. 提案したスイープ法では周波数点ごと独立にQ値を同定



図-8 第二段階の同定で推定された *Q* 値 (イベント 2 の 地震記録を用いた場合)

しているため、たとえ有意な感度をもっていてもノイズ などの影響を敏感に受けて、そのような結果になったも のと考えられる. Q値が周波数に依存することを前提と した場合、周波数に対して連続的に変化すると考えるの が自然であり、スイープ法の利点を活かしながら、同定 手法を改良することが今後必要である.

5. まとめ

本研究では、地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた 地盤の同定問題において、特にQ値の周波数依存性を抽 出することを目的としたスイープ法を提案した.この方 法では、同定の手順が2段階になっており、第一段階で 地盤各層のS波速度と全層一律かつ周波数に依存しない Q値が同定される.第二段階では、S波速度を固定し、 周波数点ごとにQ値が同定される.その際、評価関数に 対してQ値の感度の低い周波数点については、Q値は設 定された上下限値の範囲外に自動的に掃き出され、結果 として有意な感度を持つ周波数点のQ値が抽出されるこ とが期待できる.

以下にスイープ法を用いていくつかの実地盤の同定を 行った結果について述べる.

- 設定したQ値の上下限値が感度の低い周波数点の値 を吸い取ることにほぼ成功しており、スイープ法の 効果を確認することができた。
- 同定されたQ値から、周波数が高くなるに従って大 きくなるというトレンドがほとんどの地点で確認で きた.
- 3) 同一地点について異なる地震による地盤震動記録を 用いて同定を行ったところ、類似の結果が得られ、



図-9 スイープ法により第二段階で同定された Q値;上段と下段がそれぞれイベント1と2の地震記録を用いて 同定した各サイトのQ値

スイープ法の可能性を確認することができた.

しかし、感度の高い隣接する周波数点であっても同定 結果にばらつきがあり、これをどのように考えて処理と 評価をしていくかについて課題が残った.

謝辞:独立行政法人防災科学技術研究所の基盤強震観測 網(KiK-net)のデータを使わせて頂いた.また、本研究の 一部は、独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号:17560437)によった.記して感謝の意を表 する.

参考文献

- 太田裕:地震工学への最適化手法の適用-1.八 戸港 SMAC 設置点の地下構造推定,日本建築学会 論文報告集,第229号,pp.35-41,1975.
- 2) 佐藤智美,川瀬博,佐藤俊明:ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的特性,日本建築学会構造系論文集,第461号, pp.19-28, 1994.
- Tsujihara,O. Sawada,T. and Sugito,M. : Identification of Subsurface Layers of the Ground by Using Vertical Array Records, Proc. of Fourth U.S. National Conference on

Earthquake Engineering, Vol.1, pp.395-403, 1990.

- 4) 安中正,都築富雄,増田民夫,嶋田昌義,岡留孝 ー:鉛直アレー観測記録から推定した表層地盤の 剛性率及び減衰定数のひずみ依存性,第9回日本 地震工学シンポジウム論文集,pp.493-498,1994.
- 5) 野澤貴,石田寛:鉛直アレー地震観測記録を用いた地盤定数の評価に関する一考察,第10回日本地 震工学シンポジウム論文集, pp.1241-1244, 1998.
- (6) 澤田勉,服部哲,藤本喜治,平尾潔:鉛直アレー 観測記録によるQ値の周波数依存性の同定に関す る研究,第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.601-606,1998.
- 7) 独立行政法人防災科学技術研究所基盤強震観測 KiK-net, URL:http://www.kik.bosai.go.jp/kik/,2006.
- 11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, pp.80-81, 1982.
- 澤田勉, 辻原治, 平尾潔, 山本英史: 地盤のS波 速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用, 土木学会論文集, No.446/I-19, pp.205-213, 1992.
- 10) 物理探査学会:物理探査ハンドブック手法編, p.16, 1998.

(2007.4.6 受付)

PROPOSAL OF SWEEPING METHOD FOR IDENTIFICATION OF DAMPING PROPERTIES OF SUBSURFACE GROUND USING VERTICAL ARRAY RECORDS OF EARTHQUAKE GROUND MOTIONS

Osamu TSUJIHARA and Tsutomu SAWADA

Many seismographs have been installed in Japan since the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake which brought severe damages to around the city of Kobe. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) deploys digital strong-motion seismographs (KiK-net) all over the country in Japan, which provide vertical array records of ground motions. The total number of observation sites is nearly 700. Data observed by KiK-net can be used to identify the dynamic properties of the subsurface ground. In this study, a new approach is proposed to identify the quality factor, and its problem is discussed.