

地盤同定問題における減衰モデル と推定精度の関係

辻原 治¹・澤田 勉²

¹正会員 博士(工学) 和歌山工業高等専門学校助教授 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正会員 工博 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)

本研究は、地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた水平成層地盤構造の同定問題において、減衰モデルと同定精度との関係を明らかにすることを目的とした。この種の地盤同定問題では、S波の一次元重複反射を仮定して、一般に剛性と減衰のパラメータが同定される。剛性については地盤各層のS波速度が同定の対象となる。一方減衰については、いくつかのモデルが提案されており、また同定の対象が地盤各層のパラメータであったり、全層一律のパラメータであったりする。本論文では、減衰モデルの違いに加え、解析条件の違いが減衰パラメータの同定精度にどのように影響するかを示した。

Key Words : earthquake ground motions, vertical array, identification of subsurface ground model, damping model, accuracy

1. はじめに

近年、地震計の普及により、国内外で地震動のアレー観測が多数実施されるようになった。これらのうち、鉛直方向に設置された地震計によるアレー観測記録を用いると、地震時地盤の動的特性が推定でき、耐震工学上有用な情報が得られる。最近、このような鉛直アレー観測記録を用いた地盤同定が盛んに行われるようになった^{たとえば1)~7)}。

この種の研究では、一般に、鉛直アレー観測記録のスペクトル比とS波の一次元重複反射理論より計算した地盤モデルの周波数伝達関数との残差平方和を目的関数とし、これを最小化するような地盤のS波速度と減衰が同定される。S波速度については、水平成層構造としてモデル化された地盤各層の値が同定される。他方、減衰に関しては、周波数依存型のモデルが用いられたり^{2),4),5),6)}、周波数非依存型のモデルが用いられたり^{1),3),7)}している。また、地盤各層の減衰モデルのパラメータを同定している場合^{1),3),4),5),7)}や、減衰モデルを全層一律として少ないパラメータを同定している場合^{2),6)}があり様ではない。これは、実地盤における減衰機構が、内部減衰、逸散減衰や散乱減衰等が相まって複雑になっていることと、最適解の近傍で各層の減衰パラメータがS波速度よりも鈍感であること等に起因するものと考えられる。いずれの減衰モデルを用いるにしても、同定結果の信頼性を把握しておくことは重要である。

地盤構造の同定に関して、得られた最適解の信頼性に言及した研究が最近発表されるようになって

た。Kurita & Matsui⁷⁾は、観測記録に含まれるノイズに関する感度解析によって、未知変数の推定精度を評価する方法を示した。吉田ら^{8),9)}は、目的関数の最小化にMarquardt法¹⁰⁾を適用する方法において、未知変数の推定値の共分散行列が近似的に評価できることを指摘している。また、辻原ら¹¹⁾は、最小二乗問題における誤差伝播法則に基づき、観測記録のスペクトル比に無相関の偶然誤差がノイズとして混入されている場合の未知変数の推定誤差評価法を示し、数値計算によりその妥当性を検討している。

減衰を精度良く同定しようと思えば、複雑な減衰機構でも表現できるように多変数を用いた減衰モデルを構築し、かつ地盤各層におけるモデル変数を同定することが望ましい。しかし、同定すべき変数が増えると、それだけ問題が複雑になり、場合によっては最適解を見いだすことが困難になる。また、最適解が得られたとしても、その信頼性が非常に劣る場合もあり得る。このような定性的な傾向は、これまでにも指摘されているが、解析モデルや解析条件による推定精度の違いを定量的に評価した研究はほとんどない。

本研究は、減衰モデルの良否を議論するのではなく、減衰モデルの違いに加え、S波速度とQ値を同時に同定する場合とQ値を独立に同定する場合、全層一律のパラメータを同定する場合と各層のそれを同定する場合等の条件の違いが同定の精度にどのように影響するかを示し、モデルや条件の違いによる減衰パラメータの相対的な推定精度の相違を明らかにすることを目的とする。

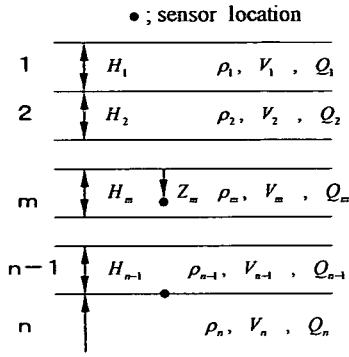


図-1 水平成層地盤モデル

2. 地盤同定問題

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仮定し、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 V_m と Q 値 Q_m 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 は既知とする。

いま、第 p 層内の点 p および第 q 層内の点 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 $X_p(f)$ 、 $X_q(f)$ とする。鉛直下方から入射した周波数 f 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 $X_0(f)$ との間にはつぎの関係が成り立つ¹²⁾。

$$X_p(f) = \gamma_p(f; \alpha) X_0(f) \quad (1)$$

$$X_q(f) = \gamma_q(f; \alpha) X_0(f) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ は同定すべき未知変数 V_j 、 Q_j 、 $j=1, 2, \dots, q$ を一般的に表し、 $N(=2q)$ は未知変数の総数を表す。また、 $\gamma_p(f; \alpha)$ 、 $\gamma_q(f; \alpha)$ は地表面に対する加速度スペクトル振幅の低減率である。

α は一般に未知であるから、式(1)、(2)は近似的にしか成立しない。そこで、未知変数ベクトル α を推定する問題を、つぎの目的関数を最小化する最適化問題として表す。

$$S(\alpha) = \sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha) - U_{pq}(f_j)\}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

ここに、 f_j は対象とする周波数帯を分割したときの j 番目の周波数点であり、 N_f はそれらの周波数点の総数である。また、 $U_{pq}(f_j; \alpha)$ および $U_{pq}(f_j)$ は次式で与えられる。

$$U_{pq}(f_j; \alpha) = \left| \gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha) \right| \quad (4)$$

$$U_{pq}(f_j) = \left| X_p(f_j) / X_q(f_j) \right| \quad (5)$$

式(4)における $\gamma_p(f_j; \alpha) / \gamma_q(f_j; \alpha)$ は一種の周波数伝達関数である。式(3)の目的関数は、観測記録から推定された周波数伝達関数の振幅とその理論値との残差平方和として表されている。

このように、式(3)を最小化することによって、最も深い位置にある観測点から地表までの地盤各層の S 波速度および Q 値を推定することができる。全層一律の Q 値を同定する場合は、すべての層の Q 値が同じ値を持つようにする。

3. 推定精度の評価法

以下に、最小二乗問題における誤差伝播法則に基づき、観測記録のスペクトル比にノイズが混入されている場合の未知変数の推定誤差評価法を示す。ここでは、その概要を述べるが、詳細は文献 11) および 13) を参照されたい。

式(5)の $U_{pq}(f_j)$ 、 $j=1, 2, \dots, N_f$ を観測値と見なし、観測値に誤差 ε が含まれているものとし、 ε は偶然誤差で相関がなく、次式で表されるものとする。

$$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{N_f}\}^T \quad (6)$$

$$E\{\varepsilon_i\} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, N_f) \quad (7)$$

$$E\{\varepsilon_i \varepsilon_j\} = \begin{cases} \sigma^2 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (8)$$

このとき、未知変数 α_i の推定誤差分散 $\sigma_{\alpha_i}^2$ は次式で表される。

$$\sigma_{\alpha_i}^2 = m_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1} \quad (9)$$

ここに、 \mathbf{A} は $a_{jk} = \partial U_{pq}(f_j; \alpha_k) / \partial \alpha_k$ 、 $j=1, 2, \dots, N_f$ 、 $k=1, 2, \dots, N$ を係数とする行列である。 α_k は未知変数の推定値を表す。 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})_{ii}^{-1}$ は $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ の逆行列における第 i 行第 i 列の係数を表す。また、観測誤差の分散 σ^2 の不偏推定量 m_0^2 は次式で表される。

$$m_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha_c) - U_{pq}(f_j)\}^2}{N_f - N} \quad (10)$$

4. 減衰モデルと同定精度の関係

辻原ら¹¹⁾は地盤各層の S 波速度と周波数非依存の Q 値を同定する問題において、式(9)で得られる結果がモンテカルロ法で得られる結果と対応することを示している。

ここでは式(9)に基づき、Q 値のモデルと同定の対

● sensor location

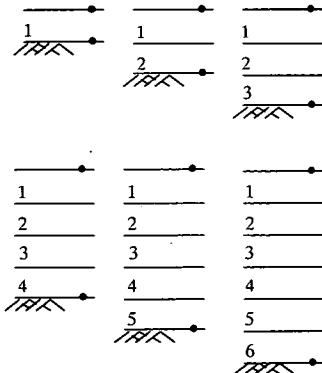


図-2 解析地盤モデル

表-1 地盤モデルにおける各層の動特性値

層番号	層厚 (m)	単位重量 (kN/m ³)	S波速度 (m/sec)	Q値		
				Model1		Model2
				Q ₀	Q ₀	n
1	10	13.72	100	5	3	0.5
2	10	14.70	200	5	3	0.5
3	10	15.68	250	5	3	0.5
4	10	16.66	300	5	3	0.5
5	10	17.64	350	5	3	0.5
6	10	18.62	400	5	3	0.5

象とするパラメータ等の違いが同定精度に及ぼす影響を数値計算により比較する。

(1) Q=Q₀モデルとQ=Q₀ⁿモデルの比較

周波数に依存しないQ値のモデル(Q=Q₀)と最近よく用いられる周波数のn乗に比例するモデル(Q=Q₀ⁿ)について以下の各ケースを比較した。

- Case1) 各層のS波速度とQ値を同時に同定する場合
- Case2) 各層のS波速度と全層一律のQ値を同時に同定する場合
- Case3) S波速度を既知として各層のQ値を同定する場合
- Case4) S波速度を既知として全層一律のQ値を同定する場合

地盤モデルは、図-2に示す6種類とする。各層の土の動特性値を表-1に示す。地表に近い層から順に層番号を付けている。Q値については、Q=Q₀のモデルをModel1、Q=Q₀ⁿのモデルをModel2としている。Q値については、全層同じ値を設定しているが、層ごとのパラメータを同定するCase1とCase3については、拘束条件を設けず、各層のパラメータを独立に同定する。地震計の鉛直アレーは図-2に示すように、地表および同定の対象とする地層の最下点の2点で構成されているものとする。図-3にModel1とModel2のQ値を、周波数を横軸として示す。また、図-4に各地盤モデルの鉛直アレーを構成する2点間の周波数伝達関数を示す。同図に示す周波数伝達関数にノイズが混入されたものが鉛直アレー観測記録のスペクトル比であるとして、そのノ

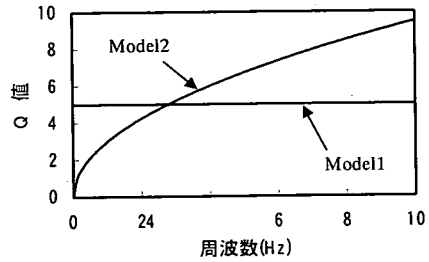
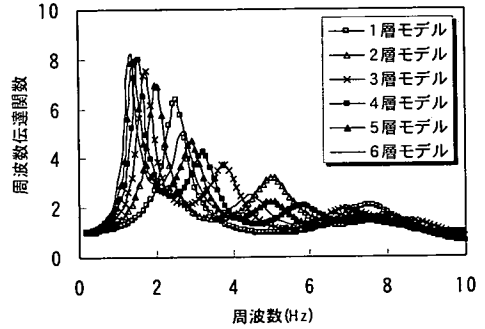
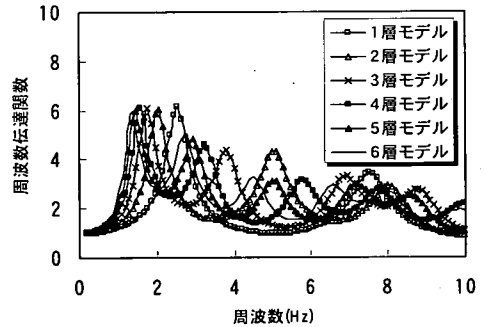


図-3 Q値のモデルの比較 (Model1, Model2)



(a) Q値として Model1 を用いた場合



(b) Q値として Model2 を用いた場合
図-4 地盤モデルの周波数伝達関数

イズの平方和が次式で表されるものとする。

$$\sum_{j=1}^{N_f} \{U_{pq}(f_j; \alpha_i) - U_{pq}(f_j)\}^2 = \sum_{j=1}^{N_f} \{0.05 \times U_{pq}(f_j)\}^2 \quad (11)$$

これは、それぞれの周波数伝達関数に対して、面積比で5パーセントのノイズを混入させたことを意味する。観測記録に含まれるノイズレベルに対する統一の見解はないが、本研究では解析のモデルや条件の違いによる相対的な推定精度の違いを評価することが目的であることから5パーセントとした。解析の周波数帯は0.1~10Hz、サンプル周波数の間隔を1/10.24Hz、また式(11)のN_fを101とした。

このように模擬した観測記録のスペクトル比を用いて地盤同定を行ったときに、得られる最適解

表-2 未知パラメータの推定誤差の変動係数
(減衰モデルとして Model1 を採用した場合)

Case1) 各層の S 波速度と Q 値を同時に同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
V ₁	0.0014	0.0053	0.0133	0.0109	0.0138	0.0264
V ₂		0.0065	0.0082	0.0162	0.0722	0.1894
V ₃			0.0180	0.0159	0.0468	0.0548
V ₄				0.0281	0.0289	0.1155
V ₅					0.0673	0.0953
V ₆						0.2687
平均	0.0014	0.0058	0.0132	0.0178	0.0458	0.1250

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀₁	0.0102	0.0376	0.0762	0.0736	0.1466	0.3700
Q ₀₂		0.0518	0.0572	0.1274	0.4180	1.9744
Q ₀₃			0.0988	0.1328	0.3894	0.6982
Q ₀₄				0.2014	0.2688	0.9986
Q ₀₅					0.4640	0.6736
Q ₀₆						3.0578
平均	0.0102	0.0447	0.0774	0.1338	0.3374	1.2954

Case 2) 各層の S 波速度と全層一律の Q 値を同時に同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
V ₁	0.0014	0.0051	0.0011	0.0077	0.0085	0.0114
V ₂		0.0062	0.0075	0.0123	0.0382	0.0500
V ₃			0.0134	0.0108	0.0309	0.0203
V ₄				0.0160	0.0141	0.0289
V ₅					0.0222	0.0197
V ₆						0.0340
平均	0.0014	0.0056	0.0106	0.0117	0.0228	0.0274

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀	0.0102	0.0084	0.0100	0.0096	0.0108	0.0118

Case 3) S 波速度を既知として各層の Q 値を同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀₁	0.0080	0.0348	0.0512	0.0424	0.0626	0.0992
Q ₀₂		0.0500	0.0550	0.0764	0.3240	0.6242
Q ₀₃			0.0798	0.0988	0.2968	0.1690
Q ₀₄				0.1304	0.1538	0.3778
Q ₀₅					0.2016	0.3042
Q ₀₆						0.5442
平均	0.0080	0.0424	0.0620	0.0870	0.2078	0.3531

Case 4) S 波速度を既知として全層一律の Q 値を同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀	0.0080	0.0076	0.0070	0.0070	0.0032	0.0032

の信頼性を式(9)によって評価した。Model1およびModel2を用いた場合の未知パラメータの推定誤差の変動係数をそれぞれ表-2と表-3に示す。ただし、Model2において各層のQ値を同定する場合でも、指数nは全層一律としている。表中のV_iとQ_{0i}は第i層のS波速度とQ₀を表す。

各層のS波速度とQ値を同時に同定する場合、従来から指摘されているように、Q値の方が推定精度が劣り、平均的にみると変動係数が10倍程度あるいはそれ以上となっている。一つのケースの中で層ごとにパラメータの推定精度が異なっているが、

表-3 未知パラメータの推定誤差の変動係数
(減衰モデルとして Model2 を採用した場合)

Case1) 各層の S 波速度と Q 値を同時に同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
V ₁	0.0012	0.0029	0.0095	0.0043	0.0066	0.0087
V ₂		0.0043	0.0082	0.0094	0.0220	0.0590
V ₃			0.0126	0.0123	0.0180	0.0177
V ₄				0.0143	0.0168	0.0383
V ₅					0.0230	0.0222
V ₆						0.0710
平均	0.0012	0.0036	0.0101	0.0109	0.0173	0.0361

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀₁	0.0220	0.0463	0.3867	0.0843	0.4347	0.4913
Q ₀₂		0.0433	0.0607	0.1180	1.1310	2.8447
Q ₀₃			0.3657	0.1093	0.2490	0.8227
Q ₀₄				0.1733	0.5007	1.4106
Q ₀₅					0.8690	0.4060
Q ₀₆						3.4713
n	0.0300	0.0320	0.1200	0.0440	0.2260	0.1960
平均	0.0260	0.0406	0.2333	0.1058	0.5684	1.3769

Case 2) 各層の S 波速度と全層一律の Q 値を同時に同定する場合

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
V ₁	0.0012	0.0029	0.0089	0.0040	0.0053	0.0062
V ₂		0.0043	0.0080	0.0089	0.0196	0.0310
V ₃			0.0120	0.0096	0.0165	0.0144
V ₄				0.0134	0.0120	0.0218
V ₅					0.0198	0.0133
V ₆						0.0361
平均	0.0012	0.0036	0.0096	0.0090	0.0146	0.0205

	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀	0.0220	0.0207	0.0183	0.0187	0.0187	0.0187
n	0.0300	0.0300	0.0280	0.0320	0.0320	0.0380
平均	0.0260	0.0253	0.0232	0.0253	0.0253	0.0283

Case 3) S 波速度を既知として各層の Q 値を同定する場合

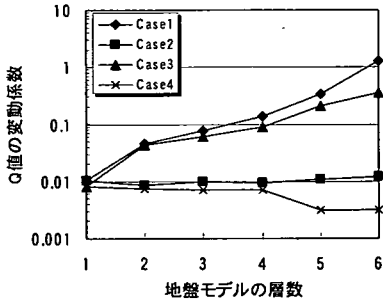
	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀₁	0.0217	0.0460	0.3407	0.0777	0.3377	0.3173
Q ₀₂		0.0427	0.0590	0.1100	0.9373	1.6887
Q ₀₃			0.3217	0.0917	0.2317	0.5070
Q ₀₄				0.1490	0.3707	0.8333
Q ₀₅					0.7127	0.2220
Q ₀₆						1.9573
n	0.0300	0.0320	0.1100	0.0360	0.1780	0.1500
平均	0.0258	0.0402	0.2078	0.0929	0.4613	0.8108

Case 4) S 波速度を既知として全層一律の Q 値を同定する場合

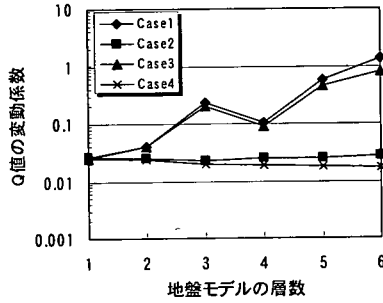
	1 層 モデル	2 層 モデル	3 層 モデル	4 層 モデル	5 層 モデル	6 層 モデル
Q ₀	0.0217	0.0200	0.0173	0.0160	0.0153	0.0147
n	0.0300	0.0280	0.0220	0.0220	0.0200	0.0200
平均	0.0258	0.0240	0.0197	0.0190	0.0177	0.0173

これはパラメータの感度に起因する。

まず、S波速度の精度に着目すると、Model2を用いる方が、推定精度が高くなっているのがわかる。Case1においては、この傾向は地盤モデルの層数が増すにつれ顕著になっている。これは、Model2の周波数伝達関数が高周波数でよりシャープなピー



(a) Model1



(b) Model2

図-5 減衰パラメータの変動係数(平均値)の比

クを持っており、ピーク周波数を左右する各層のS波速度の目的関数に対する感度が相対的に大きくなっているためと考えられる。

つぎにQ値については、S波速度と同時に各層のパラメータを同定するCase1では、地盤モデルの層数が増すごとにQ値の推定誤差の変動係数が数倍ずつ大きくなっていることがわかる。5層モデルから6層モデルに層数が増した場合でみると、推定精度は2~4倍悪化している。これ以上層数を増やすと更に精度は悪化する。S波速度を既知としたCase3でも程度の差はあるが同様の傾向は見られる。各ケースにおける減衰パラメータの変動係数の平均値を図-5に示す。6層モデルの場合に、Model1でCase1とCase4を比較すると、推定誤差の変動係数が数百倍になっていることがわかる。利用できるセンサーの数や設置深さにもよるが、各層のQ値を同定する場合、同定の対象とする地盤モデルの層数が多い場合には、解析結果の信頼性に特に注意を払う必要がある。全層一律のQ値を同定するCase2とCase4については、地盤モデルの層数の影響をあまり受けず、Q値の推定精度は安定している。S波速度を同時に同定するCase2では、Case1よりもS波速度の精度も向上している。これは、同時に同定するパラメータの数による違いと考えられる。また地盤モデルの層数が増すと、S波速度と同程度の精度でQ値も同定可能であることがわかる。Model2を用いた場合、 Q_0 と n の推定誤差の変動係数の平均はModel1の Q_0 の変動係数よりも大きくなっているが、モデル変数が2個であるか1個であるかの違いがあり、当然の結果と考えられる。

表-4 減衰モデルのパラメータ

Model1	Model2		Model3		
Q_0	Q_0	n	Q_0	b	f_u
5	3	0.5	10	0.5	3

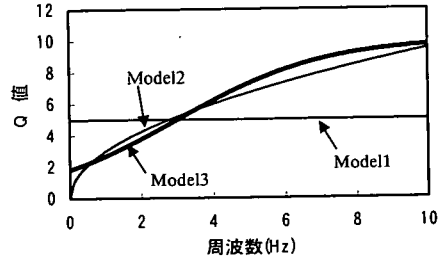


図-6 Q値のモデルの比較(Model1,Model2,Model3)

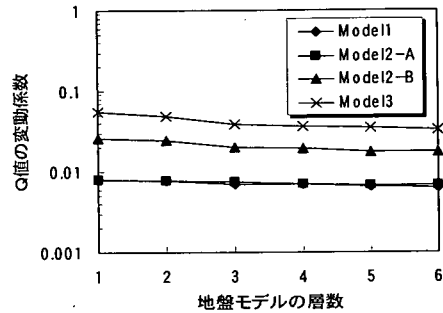


図-7 減衰パラメータの変動係数の平均値

(2)他の減衰モデルとの比較

前節で述べた2つの減衰モデル以外に澤田ら⁶⁾が用いているつぎの減衰モデル (Model3) を追加し、推定精度を比較する。

$$\text{Model3: } Q = Q_0 \frac{1}{1 + \exp\{-b(f - f_u)\}}$$

Model2が、低周波数でQ値が0に漸近し、また高周波数で上限値がないようなモデルになっているが、Model3はこれを改良したものである。未知変数は Q_0 、 b および f_u である。

ここでは、前節のCase4に相当する、S波速度を既知として全層一律のQ値を同定する場合についての結果を示す。それぞれの減衰モデルのパラメータと周波数に対するQ値をそれぞれ表-4と図-6に示す。地震計の鉛直アレーは前節と同様に、地表および同定の対象とする地層の最下点の2点で構成されているものとする。図-7に、各減衰モデルについて、パラメータの推定誤差の変動係数の平均値を示す。Model2については、指数 n を既知として Q_0 のみ同定する場合(Model2-A)と前節と同じように n 、 Q_0 を同時に同定する場合(Model2-B)の2とおりの計算を行っている。指数 n を既知とした場合は、Model1でもModel2でもほぼ同じ精度で Q_0 の推定値が得られている。最も推定誤差が大き

い Model3 でも変動係数は 0.04 以下になっており、どの減衰モデルを用いても減衰パラメータの推定精度は高く、また地盤モデルの層数に影響を受けないことがわかる。Model1 の推定誤差に対する各減衰モデルの推定誤差の比は、Model2-B で 2.5~3 倍、Model3 で 5~5.5 倍の範囲である。

同定精度の観点からは、Model1 が優れているが、実地盤の減衰が Model1 で表されるように、周波数に依存せず一定値をとる保証はない。したがって、未知変数の増加によって推定精度が多少劣化しても、周波数依存型の減衰モデルを用いることが勧められる。とくに Model3 は他の減衰モデルを概ね包含するモデルであり、パラメータの数は最も多いが、全層一律の減衰パラメータを同定するのであれば、他の減衰モデルのパラメータと大差ない精度で同定できそうである。また、剛性パラメータと減衰パラメータは同時に同定すると精度の劣化を招く。これらを別々に同定し²⁾、さらに交互に繰り返す行等の工夫をすることで、より高精度の結果が得られると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地震動の鉛直アレー観測記録を用いた水平成層地盤の同定問題において、減衰モデルおよび解析条件の違いが同定の精度に及ぼす影響を検討した。

以下に得られた結果を要約する。

- (1) センサーの数等にもよるが、同定の対象とする地盤モデルの層数が増すと、層ごとの減衰パラメータを同定した場合、その精度が著しく悪化する。6 層モデルで推定誤差の変動係数が数百倍異なるケースもあった。多層構造の Q 値を層ごとに同定する場合は、その推定精度に注意する必要がある。
- (2) 全層一律の Q 値を同定する場合、地盤モデルの層数に関係なく、安定した精度で結果が得られる。むしろ層数が増した方が、精度がよくなる傾向がみられた。
- (3) 3 種類の減衰モデルを用いて比較したが、全層一律のモデルパラメータを同定する場合、大差ない精度で同定できることがわかった。

参考文献

- 1) 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: ポ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.
- 3) 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, 岡留孝一: 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) Kurita, T. and Matsui, K.: Sensitivity Analysis on Measurement noise in the Identification of Soil Properties from Vertical Array Observation Data, E.E.S.D., Vol.26, pp.951-965, 1997.
- 8) 吉田郁政, 佐々木卓也, 星谷勝: 逆解析によって推定されたモデルの信頼度と最適観測点位置, 応用力学論文集, Vol.1, pp.109-116, 1998.
- 9) 吉田郁政, 豊田耕一, 星谷勝: 2次元 FEM を用いた確率論に基づく逆解析の定式化とその解放, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.129-136, 1995.
- 10) Gallagher, R.H. and Zienkiewicz, O.C. (川井忠彦, 戸川隼人監訳): 最適構造設計-基礎と応用-, 培風館, pp.61-62, 1977.
- 11) 辻原治, 澤田勉: 鉛直アレー観測記録を用いた地盤の S 波速度と Q 値の同定精度に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.801-808, 1999.
- 12) 土岐憲三: 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, pp.80-81, 1982.
- 13) 田島稔, 小牧和雄: 最小二乗法の理論とその応用[改訂版], 東洋書店, pp.165-180, 1982.

(2002.9.5 受付)

RELATION BETWEEN DAMPING MODEL AND ACCURACY IN IDENTIFICATION OF SUBSURFACE GROUND

Osamu TSUJIHARA and Tsutomu SAWADA

The purpose of this study is to investigate the relation between the damping model used in the horizontally laminated ground model and the accuracy in identification of the parameters using vertical array records of ground motions. The stiffness and damping parameters are generally identified in this type of problem, supposing one-dimensional multiple reflection of shear wave. As to the stiffness, the shear wave velocity of each layer is identified. On the other hand, as to the damping, several models have been proposed, moreover some researchers identified uniform parameters through the layers and others identified the parameters of each layer. In this paper, it is demonstrated how the difference of damping model and conditions of analysis influence on the accuracy of identification of damping parameters.