

東電設計（株） 正会員 安中 正、都築富雄

東京電力（株） 正会員 増田民夫、嶋田昌義、岡留孝一

1. まえがき 近年、大加速度の強震記録が得られるようになり、記録の解析から強震時の実地盤の非線形性を直接検討し、室内試験によるひずみ依存曲線の妥当性を検討することが行われるようになってきた¹⁾。このため、観測記録から地盤物性の変化を精度良く推定することが重要になってきている。本研究では、ベイズ的アプローチに基づく非線形インバージョン手法²⁾³⁾の有効性を模擬データと実データに基づき検討した。

2. データ及びベイズ的推定法 検討に用いた観測点は東京湾岸の埋立地盤に設置されている。PS検層を含む詳細な地盤調査により得られている観測点の地盤構造と地震計の設置位置を表-1に示す。

鉛直アレー観測記録から得られる2点間の伝達関数と、地盤モデルから1次元波動理論により計算される伝達関数が最も良く適合するように地盤物性を求める問題を考える。層区分と各層の単位体積重量は既知とし、各層のS波速度と減衰定数を求めるものとする。このような問題では、一般に解の一意性が保証されていないため、極値を追い過ぎると非常に不自然なモデルに収束することが生じやすい。これを避ける方法として、初期モデルを先験的情報に基づく最も確からしいモデルと考えるベイズ的なアプローチがある²⁾³⁾。

ベクトル形式の非線形な観測方程式を $y^0=f(x)+e$ 、モデルパラメータ x に関する先験的情報を $x^0=x+d$ とすると、データ y^0 が与えられた時にベイズの規則を適用して得られる事後確率密度分布を最大にする x は

$$s(x)=(y^0-f(x))^T E^{-1}(y^0-f(x))+x^0-x)^T D^{-1}(x^0-x)$$

を最小にする x であり、モデルパラメータの先験的推定値 x^0 はデータに基づき修正される。ここで、 E は誤差 e の分散・共分散行列、 D は誤差 d の分散・共分散行列であり、 e と d はどちらも平均値0のまわりに正規分布していると仮定されている。 $s(x)$ を最小にする x は反復法を用いて求めることができる。この方法を厳密に適用するためには E と D の分散・共分散行列を設定する必要があるが、今回は単純化して対角項のみを考慮し、非対角項は無視した。適合度を評価するための観測値としては伝達関数の振幅の自然対数を用いた。

3. 模擬データへの適用 地盤の非線形性により初期モデルに比べS波速度が減少し減衰定数が増加した場合を想定し、初期モデルからのずれがどの程度正しく評価されるかを模擬データを用いてまず検討した。検討結果を表-2に示す。減衰の周波数依存性は $h=h_0/f^p$ で表現し、 $p=1.0$ とした。初期モデルのS波速度は表-1の値を用い h_0 は30%とした。模擬データ（伝達関数の振幅）は、1987年12月17日千葉県東方沖地震（M6.7）の地表観測波形及びそれから目標モデルを用いて計算した地中波形からスペクトルを計算し、地表と地中の3つの組み合わせに対して求めた。スペクトルは、S波主要動を含む40.96秒間のデータからFFT

表-1 観測点の地盤構造と地震計の設置位置

Layer No.	Thickness (m)	Vs (m/s)	Density (g/cm ³)	Seismometers
1	5.0	100	1.85	● G.L.-1.5m G4
2	5.0	100	1.50	
3	4.0	170	1.80	
4	3.0	420	1.70	
5	5.0	220	1.60	
6	9.5	420	1.80	● G.L.-22.3m G3
7	1.5	520	1.80	
8	6.0	320	1.72	
9	7.0	420	1.85	● G.L.-38.5m G2
10	16.0	340	1.85	
11	12.0	500	2.05	● G.L.-80.0m G1
12	-	560	1.80	

表-2 模擬データを用いた場合の検討結果

Layer No.	Shear Wave Velocity (m/s)			Damping Factor ho (%)		
	Initial model	Optimal model	Target model	Initial model	Optimal model	Target model
1	100	90	90	30.0	57.9	60.0
2	100	90	90	30.0	58.7	60.0
3	170	160	160	30.0	44.5	42.0
4	420	420	420	30.0	30.4	30.0
5	220	220	220	30.0	32.0	30.0
6	420	420	420	30.0	30.1	30.0
7	520	520	520	30.0	30.0	30.0
8	320	320	320	30.0	31.9	30.0
9	420	420	420	30.0	30.1	30.0
10	340	340	340	30.0	29.9	30.0
11	500	500	500	30.0	29.1	30.0
12	560	560	560	30.0	30.4	30.0

により計算し、バンド幅0.1HzのParzenウィンドウにより平滑化したものをを用いた。分散については、標準偏差として伝達関数の振幅は1、S波速度は30、減衰定数は0.54とした。模擬データに手法を適用した結果が最適モデルであり、S波速度は目標モデルと同じであり、減衰も目標モデルに近い。

4. 観測データへの適用 最初に地盤の非線形性がみられないと考えられる地表最大加速度が $10\sim 25\text{cm/s}^2$ の8個の地震の記録から求めた伝達関数の振幅データに対して手法を適用した。pは、表-1の速度構造を固定し減衰を全層で同じとして推定した結果（X成分は $p=0.315$ 、 $h_o=7.9\%$ 、Y成分は $p=0.330$ 、 $h_o=7.1\%$ ）に基づき $p=0.32$ と設定した。分散については、試行錯誤的な検討に基づき、伝達関数の振幅の標準偏差はデータから求めた各周波数の標準偏差を7倍した値、S波速度は10、減衰定数は0.06を用いた。結果を表-3に、伝達関数の振幅の比較例を図-1に示す。

次に表-3の最適モデルを初期モデルとして、最大加速度が最も大きな1987年千葉県東方沖地震の場合を検討した。伝達関数の振幅のピークの位置が最大加速度が小さい8個の地震の平均に比べ明瞭にずれていることを図-2に、この地震の解析結果を表-4に、伝達関数の振幅の比較例を図-3に示す。2成分とも初期モデルに比べ、第1層と第2層のS波速度が小さくなっている。また、Y成分では地表付近の減衰が大きくなっている傾向がみられる。

5. あとがき バイズ的な手法が鉛直アレー記録から地盤物性のひずみ依存性を同定する手法として非常に有効であり、有意と考えられる変化を安定的に求めることができることを示した。ただし、現状では分散の設定に任意性があり、分散・共分散行列の性質を検討し、手法の中に取り込むことが今後の課題として残されている。

本研究は、地震予知総合研究振興会の「地盤震動解析法の高度化に関する研究」の一部として実施しました。

【参考文献】

- 1) 翠川三郎(1993) 地震2, 46, 207-216
- 2) Jackson, D.D. and M. Matsu'ura(1985) J. Geophys. Res., 90, 581-591.
- 3) 松浦充宏(1991) 地震2, 44s, 53-62.

表-3 小加速度記録による最適モデル

Layer No.	Shear Wave Velocity (m/s)			Damping, h_o (%), $p=0.32$		
	Initial model	Optimal model X	Optimal model Y	Initial model	Optimal model X	Optimal model Y
1	100	98	100	7.5	8.4	7.9
2	100	104	101	7.5	8.4	6.7
3	170	155	157	7.5	7.8	6.7
4	420	419	419	7.5	7.5	7.4
5	220	223	224	7.5	6.7	7.6
6	420	419	417	7.5	7.7	6.9
7	520	520	520	7.5	7.6	7.5
8	320	324	322	7.5	8.8	7.5
9	420	420	419	7.5	7.2	7.0
10	340	343	341	7.5	7.6	7.1
11	500	502	501	7.5	7.2	6.6
12	560	561	560	7.5	6.7	6.6

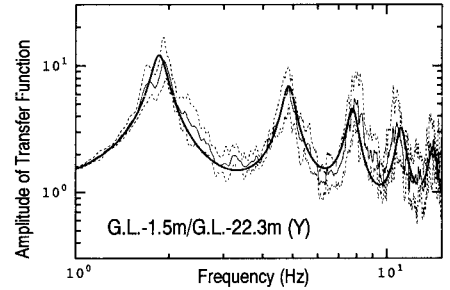


図-1 観測（細い実線が平均、破線が平均±標準偏差）と計算（太い実線）の比較

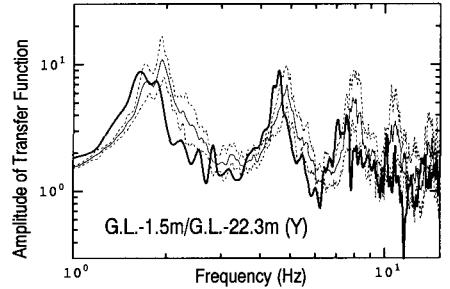


図-2 小加速度記録（図-1と同じ）と1987年千葉県東方沖地震（太い実線）の比較

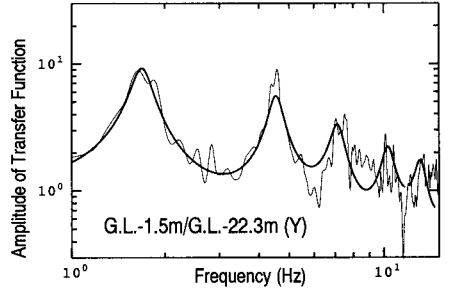


図-3 1987年千葉県東方沖地震の観測（細い実線）と計算（太い実線）の比較

表-4 大加速度記録による最適モデル

Layer No.	Dec. 17, 1987 (M=6.7, H=58km)			
	X-comp: 77cm/s^2		Y-comp: 113cm/s^2	
	Vs (m/s)	h_o (%)	Vs (m/s)	h_o (%)
1	86	9.2	94	11.6
2	86	7.7	85	8.6
3	147	8.1	162	9.1
4	419	7.3	419	7.4
5	228	5.7	217	7.8
6	413	7.4	414	7.2
7	520	7.7	520	7.6
8	323	11.6	318	9.2
9	419	7.4	418	6.7
10	345	8.3	340	7.6
11	502	7.9	500	5.7
12	562	6.8	560	5.7