

上下動の鉛直アレー観測記録を用いた 地盤定数の推定

池本敏和¹・宮島昌克²・北浦 勝³・八木正雄⁴・高畠大知⁵

¹正会員 金沢大学助手 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野2-40-20)

²正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (同 上)

³フェロー 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (同 上)

⁴積水ハウス株式会社 (〒567-0873 茨城市小川野1-18)

⁵学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程1年

構造物の耐震設計を行う上で、入力地震動の設定は重要な課題である。このとき、問題となるのは地震時の地盤動特性である。一般に、水平動についての検討は精力的になされているが、上下動については十分な検討が行われていない。しかし都市直下型の地震においては震央距離が短いため、地震動の上下動成分が十分に減衰しない場合が多いことから、上下動に対する検討が重要であると考えられる。

そこで本研究では、鉛直アレー観測記録を用いて、上下動に注目した地盤動的定数を推定できる逆解析手法を提案をするとともに、地盤動的定数の推定を試みた。線形解析の結果、推定された地盤定数を用いて求めたフーリエスペクトルと観測波のそれは一致した。同様に、等価線形解析においてもある程度の合致を得ることができた。

Key Words : Inverse analysis, vertical ground motion, soil parameter, vertical array record

1. はじめに

これまで水平動を対象とした構造物や地盤の動特性を推定する方法が数多く検討されているものの、上下動については十分な検討が行われていないのが現状である^{1)~5)}。これは、上下動の加速度が水平動のそれと比べて小さいと言われてきたことや、構造物は上下動には比較的大きな強度を発揮することなどによる。しかし、兵庫県南部地震に見られるような直下型地震では、地震動の上下動成分が十分に減衰していない場合が多いことから、上下動に対する検討が重要と考えられる。

このような観点から、本研究では地盤動的定数を推定できる新たな手法として、鉛直アレー観測の上下地震動記録による逆解析手法の提案を行う。上下動を用いた本手法が確立されれば、従来の室内試験や原位置試験では行えなかった大ひずみ時における実地盤の増幅特性の評価が行えることが期待される。

2. 地盤定数の推定方法

本研究では、対象層上端面および対象層下層上端面で同時観測された加速度時刻歴を基に、観測され

た加速度時刻歴を入力として解析から得られる応答加速度と実際に観測された加速度とを比較することにより、最適な地盤動的定数を求める部分同定法を用いる。

(1) 地盤の応答

震源からある程度離れている場合、地表面付近における地震波はほぼ鉛直下方から入射すると近似することができる。作用する地震動として上下動のみを考えると、地盤の振動は上下方向への1次元振動と仮定される。各層間の地盤応答を周波数応答関数の形で表し、重複反射法によって任意の位置での地盤応答を求めた。加速度記録としては上下動を対象とするため、地震計によって観測されるNS、EW、UD成分の3方向成分のうち、UD成分を用いる。

(2) 評価関数

本研究では、観測値と計算値のフーリエスペクトルの誤差二乗和を考え、評価関数を次式で表した。

$$J = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (1)$$

ここに、 J ：評価関数、 x_i ：計算加速度のフーリエスペクトル、 X_i ：観測加速度のフーリエスペクトル、 N ：スペクトルの個数を表す。

評価関数を計算するにあたり、高い振動数成分までは考慮する必要はないと考えられるので、ここでは0.1～20Hzまでの振動数成分を取り扱う。また本研究では、最適化手法としてシンプレックス法を用いる⁶⁾。

（3）バンド幅

フーリエスペクトルに何らかの平滑化を施し、ノイズ成分の影響を軽減する必要がある。本研究では、フーリエスペクトルに対してParzenウィンドウによる平滑化を行う。バンド幅を広くとりすぎると、本来鋭いはずの共振時のピークを低下させてしまうことになり、減衰定数の推定精度に影響を及ぼす。したがって本研究では、文献1)、7)を参考にバンド幅を0.4Hzと設定する。

（4）地盤動的定数

重複反射法による地震応答解析に必要な地盤動的定数は、層厚 H 、質量密度 ρ 、疎密波速度 V_p 、減衰定数 h 、ポアソン比 ν である。これらのうち、層厚 H 、質量密度 ρ はボーリング調査から比較的精度良く推定することができる。したがって、逆解析の対象とするのは、疎密波速度 V_p 、減衰定数 h 及びポアソン比 ν とする。

3. 実地盤への適用

（1）線形解析による地盤動的定数の推定

逆解析手法を実際の地盤に適用し、実地盤における地盤動的定数の値を推定する。解析対象とするのは、東大千葉実験所構内に設置されたボーリング孔 C_0 である⁸⁾。そのボーリング柱状図を図-1に示す。図からわかるように、この地盤は地表から深さ5mまでは、 N 値10以下の関東ローム層に被われ、ローム層の下に、厚さ2～4mで N 値10以下の砂質粘土が存在する。さらに下層には、 N 値20～30の洪積砂層がある。解析に際しては、地下1～5m、5～10m、10～20mに分けて、各層の観測波形を用いる。解析対象とする地震動は、表-1に示すように地表面最大上下加速度が25gal以下のものを用いる。

解析結果を表-2に示す。地盤定数の平均値、標準偏差を求めた結果、洪積砂層において比較的ばらつきが大きかったものの、全体としてはある程度の

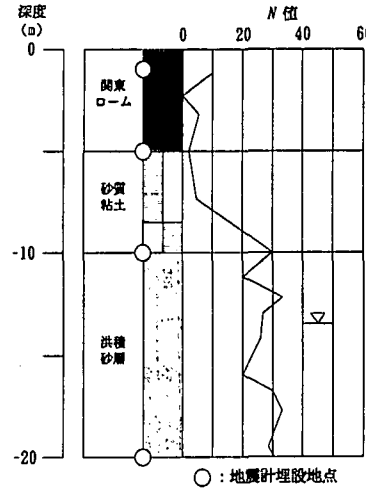


図-1 対象地盤（東大千葉実験所）

表-1 解析対象の地震

地震番号	年月日	M	震源の深さ(km)	震央距離(km)	上下最大加速度(gal)
1	1986/6/24	6.5	73.3	104.5	21.5
2	1987/6/30	4.9	56.5	62.4	11.3
3	1987/12/17	4.4	58.0	42.4	9.4
4	1987/12/17	4.0	42.0	52.3	17.7
5	1988/1/5	4.2	42.0	37.9	10.1
6	1988/1/16	5.2	47.6	37.9	18.7
7	1988/1/18	4.1	32.0	16.9	9.8
8	1988/3/18	6.0	96.1	42.2	13.5
9	1988/8/12	5.3	69.4	62.4	12.0
10	1989/2/19	5.6	55.3	47.7	23.7
11	1989/3/6	6.0	55.7	55.2	13.3
12	1989/3/11	4.9	44.5	51.8	16.0

表-2 解析結果（東大千葉実験所）

層	地盤定数	平均値	標準偏差	速度検層
関東ローム	V_p (m/s)	288	5	320
	h	0.12	0.012	—
	ν	0.39	0.007	0.38
砂質粘性土	V_p (m/s)	498	17	550
	h	0.12	0.046	—
	ν	0.39	0.012	0.24
洪積砂層	V_p (m/s)	827	52	1290
	h	0.14	0.06	—
	ν	0.38	0.041	0.4

範囲内に値が収まっていた。また今回実施した全36ケースの逆解析では、すべてにおいて安定した結果が得られた。すなわち J 値は、ほとんどのケースで0.10以下、多くても0.17程度であり、逆解析によるフーリエスペクトルの探索精度は良好であった。地震番号3の深さ1～5mにおける観測波と計算波のフー

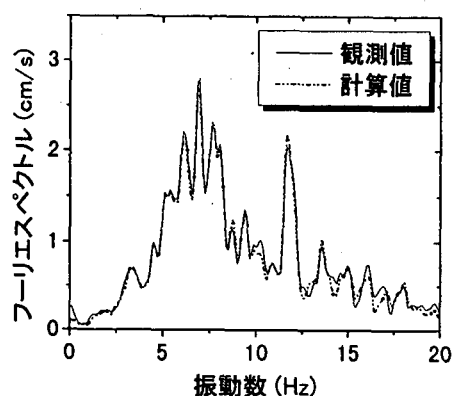


図-2 フーリエスペクトルの比較（深さ1～5m）

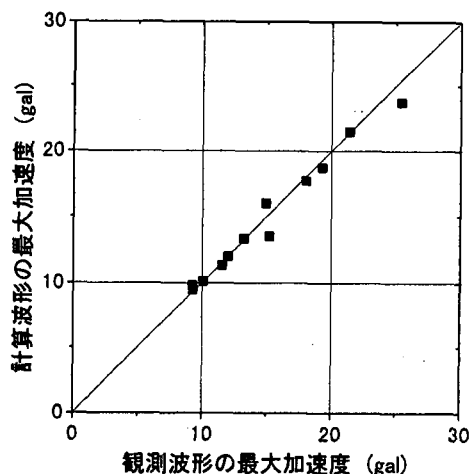


図-3 最大加速度値の比較（深さ1～5m）

リエスペクトルを図-2に示す。両者のスペクトル形状はほとんど一致していることがわかる。また、観測波形と計算波形の最大加速度を比較した例を図-3に示す。プロットされたデータは45°の線上にあり、本解析における推定精度の高いことがわかる。

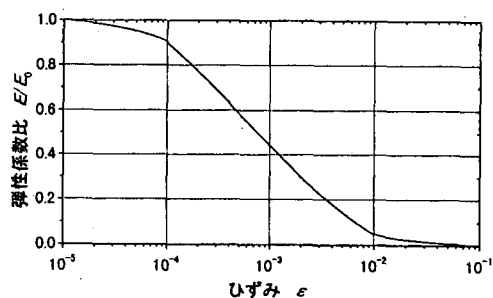
(2) 等価線形解析による推定手法の提案

ひずみが 10^{-5} より小さい場合、弾性係数 E および減衰定数 h はほぼ一定値をとるが、ひずみ振幅が大きくなってくると、弾性係数は小さくなり、減衰定数は大きくなる傾向を示すと考えられる。3.(1)の方法では、弾性係数や減衰定数がひずみに依存する解析を行えないため、ここでは上下動を対象とした等価線形化による解析法を提案する。

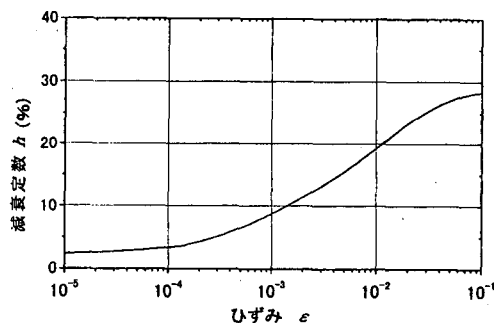
図-4は本研究に用いた弾性係数および等価減衰定数とひずみとの関係を示す曲線である⁹⁾。弾性係数はひずみが 10^{-5} のときの弾性係数 E_0 を1で基準化した値となっている。

等価線形解析手法の手順は以下のようである。

①重複反射法によって、各層における加速度時刻歴



(a) 弾性係数とひずみ



(b) 減衰定数とひずみ

図-4 弾性係数、減衰定数とひずみとの関係

を求める。

②各層の加速度波を積分して速度波とし、これと疎密波速度とによってひずみ振幅を評価する。入力地震波が非定常調和振動の場合、最大ひずみ振幅の0.5倍が等価な正弦波のひずみ振幅と見なし、この等価なひずみに対応する弾性係数および等価減衰定数を図-4の関係より得る。

③新たに得られた定数を用いて応答計算を繰り返し、前回に得られた定数と新たに得られた定数との誤差が5%以内になるまで計算を行う。

④各層の収束値が5%以内になったときの E および h が、入力地震波で生じるひずみレベルに対応した地盤の動的定数であると見なし、最終的な応答計算を行う。

⑤応答波形と実際に観測された波形のフーリエスペクトルを比較し、評価関数が最小となるよう地盤動的定数を求める。

解析対象とする地震動は、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震において、ポートアイランドで観測された強震記録である。このときポートアイランドでは、地表面での上下動最大加速度は556galであり、水平動の最大加速度341galを大きく上回っていた。また解析では、各層の質量密度 ρ を文献10)から引用した。この地盤は比較的単純な成層構造をしており、深さ0m、16m、32m、83mの4地点に地震計が設置され、部分同定法に適した観測地点であ

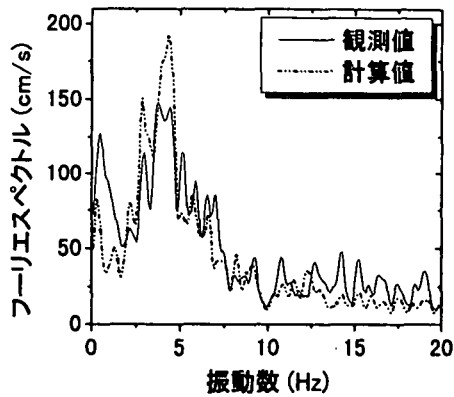


図-5 フーリエスペクトルの比較 (ポートアイランド, 深さ0~16m)

るといえる。深さ0~16mに対する計算波形と観測波形のフーリエスペクトルを図-5に示す。両者を比べてみると、振幅にやや差がみられるものの、形状はよく似ていることがわかる。また今回対象とした地盤では速度検層が実施されており¹⁰⁾、その結果と今回の逆解析により推定した V_p 値を図-6に比較する。本研究における層区分と速度検層が実施された層区分に違いがあることを考慮して比較してみると、全体的には近い値となっていることがわかる。しかし地下5~15mでは、推定値は速度検層による値よりも小さい値となっている。この理由として、この領域の地盤では N 値が3から20へと変化しており、地盤物性の急変部をモデル化の際に平均化したため推定値が小さく評価されたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、上下動の鉛直アレー観測記録を用い、線形解析および等価線形解析による地盤動的定数の推定を行い、実地盤における疎密波速度 V_p 、減衰定数 h 、ポアソン比 ν を求めた。

本研究で得られた結論をまとめると次のようになる。

- ①実地盤における逆解析手法の有効性を検討した。その結果、今回実施した全36ケースにおいて比較的安定した結果が得られた。
- ②さらに、等価線形解析手法をポートアイランドで観測された兵庫県南部地震の強震記録に適用した。深さ0~16mにおける観測値と計算値のスペクトルの形状はよく似ていることから、本逆解析法による推定が有効であることを示すことができた。

今後は等価線形解析のデータ数を増やしていく予定である。

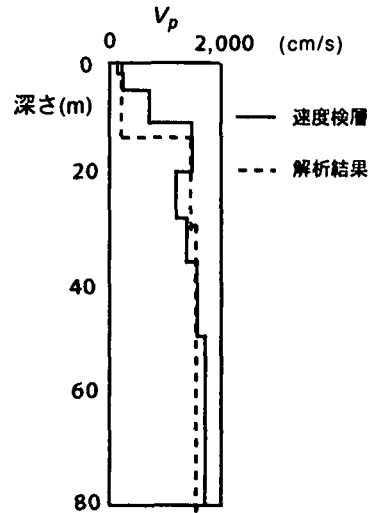


図-6 V_p の比較

謝辞：本研究を実施するにあたり観測波形データを使用させていただいた東京大学生産技術研究所千葉実験所ならびに関西地震観測協議会に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辻原治, 沢田勉, 岡本康: 地盤のS波速度とQ値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.783-792, 1993.
- 2) 本多秀夫, 小島啓介, 荒井克彦: 実地震加速度記録に基づく地盤の動的定数の逆解析, 土木学会論文集, No.517/III-31, pp.125-133, 1995.
- 3) 栗田哲史, 松井邦人: 観測ノイズに影響される同定パラメータの信頼性領域の評価, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.189-194, 1998.
- 4) 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性と最適観測点位置, 応用力学論文集, Vol.1, pp.109-116, 1998.
- 5) Zhai, E., Miyajima, M. and Kitaura, M.: Nonlinear amplifications of vertical ground motions in the 1995 Hyogoken Nambu earthquake. JJSCE. No.582/III-41, pp.1-10. 1997.
- 6) 今野 浩, 山下 浩: 非線形計画法, 日科技連, pp.284-288, 1978.
- 7) 和佐田慎吾: 鉛直アレー観測記録を用いた地盤動的定数の推定, 金沢大学修士学位論文, 1998.
- 8) (財)震災予防協会強震動アレー観測記録データベース推進委員会: 強震動アレー観測記録データベース, 1992.
- 9) 澁谷 啓, 小高猛司, 龍岡文夫: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 3.地盤材料の変形特性(その1), pp.59-63, 1997.
- 10) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告(共通編2), pp.200-201, 1998.