

常時微動観測記録による表層地盤特性の同定とその適用 — 芦屋・西宮地区の表層地盤特性 —

安藤幸治¹、岩楯敬広²

¹ 正会員 東電設計(株) 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

² 正会員 工博 東京都立大学教授 工学研究科大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

兵庫県南部地震による被害は神戸市須磨区から西宮に至るいわゆる震度7の帯の地域に集中した。このような強震動による被害の一要因として表層地盤特性との関連性が指摘されているが、この点を検討するために平成7年8月に同地震被害域を対象とした合同常時微動観測が実施された。本論文は、微動記録による地盤物性値の同定手法を提案し、芦屋・西宮地区の観測微動記録に対してこれを適用して、同定された地盤の構造および動的特性について述べたものである。

Key Words : microtremor, surface layer, model identification

1. はじめに

1993年以来、釧路沖、北海道南西沖、北海道東方沖、三陸はるか沖、そして兵庫県南部地震と大地震が多発している。特に、兵庫県南部地震は、神戸・淡路島を中心として、死者6308人、負傷者33222人、倒・損壊家屋109464棟(平成7年2月15日現在)、さらに、鉄道、港湾、地下鉄、ライフライン施設等、都市の中核をなす土木関連施設が致命的な被害を受け、戦後最大の災害をもたらした¹⁾。なかでも神戸市須磨区から西宮に至るいわゆる震度7の帯の地域に被害が集中した。

このような強震動による被害の一要因として表層地盤特性との関連性が指摘されているが、この点を検討課題として平成7年8月に地震被害域において合同常時微動観測が実施された。著者らは、都立大学、関東学院大学、神奈川大学、東京都土木技術研究所とともに芦屋・西宮地区を担当した。本論文は、地表面上の微動観測記録による地盤物性値の同定手法を提案し、この手法を当該地区で観測した微動記録に適用して同定された地盤の構造および動特性について述べたものである。

地盤は、風雨、波浪等の自然現象に起因する力や、交通機関、工場内の機械等の人工的な震動源により、わずかながら常に震動している。常時微動については表面波説や実体波説があるが、それぞれの説に基づいた解釈により微動観測記録は地盤構造の解明に広く利用されている。中村等による手法²⁾は、その代表的なものである。それは水平記録(H)の上下記録(V)に対するフーリエスペクトル比(H/V)を表層地盤の伝達関数と仮定して地

盤構造を決定するという解析手法である。ただし、この手法は表層地盤と基盤のインピーダンス比が小さい場合はスペクトル比に表層地盤の特性が明確に現れないことがあるため、どの地盤についても有効とは限らない。

2. 同定手法の定式化

ここに提案する解析手法は常時微動が実体波の特性を持つとする考えに基づいている。今、地表面上の異なる2地点で観測された常時微動記録があり、それら波形は各々の地点で一次元重複反射理論に従うものと仮定する。また観測された記録は定常確率過程の波動とみなして時間的な平均値および自己相関関数は時間の経過に関係なく不変であるとする。これは自己相関関数と互いにフーリエ変換の対をなすパワースペクトルについても同様であり、一般に微動観測の対象地域が広範囲に及ぶため全地点について同時に観測を行うのは現実的に不可能であるが、この仮定により地点毎に観測された場合でも各地点の微動記録の周波数特性に関する比較検討が可能となる。図1に地盤の模式図を示す。2地点の観測地点 S_1 、 S_2 の周辺地盤は水平成層地盤を成しているとみなす。これより必要な地盤物性値が与えられれば重複反射理論に従って各々の地表面観測記録 u_1 、 u_2 から任意の深さにおける入射波(上昇波) z_1 、 z_2 が求められる。例えば、その深さとして同図の基盤層上面のように両地点に共通な地層内の標高の同じ点を選定したならば、それら入射波はほぼ似たような波形になるはずである。勿論、上層から反射されて戻ってくる波(下降波)が存在し、それ

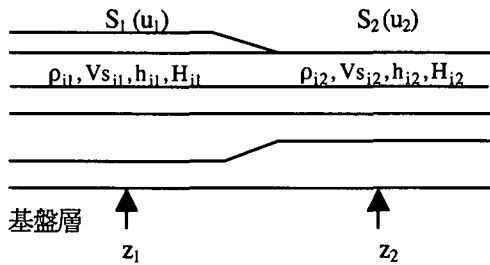


図1 地盤構造

らが基盤層以下の層境界で反射して上昇波に転じ入射波に加わるため、基盤層以深の構造によっては入射波の比較が困難な場合があるかもしれない。しかし、一般にインピーダンスは地表面に近づくにつれて小さくなるので上層から戻ってくる下降波は透過係数が1.0未満の層境界を透過することになり、仮に基盤層以深の各地層のインピーダンスに大きな違いがなければ、それら下降波の入射波に対する影響は差ほどないと考えられる。

以上より、2地点において、それぞれ微動観測記録から共通地層内（以後、基盤層と呼ぶ）同一標高の入射波の周波数スペクトルを求め、それらが同一になるという条件より双方の物性値の同定が可能となる。

はじめに重複反射理論に基づいて基盤層上面の入射波スペクトルの計算式を導いていく。

表層地盤の層毎の局所座標として層上面を原点にとり深さ方向にx軸をとれば、各層の運動方程式は次のようになる。

$$\rho \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 $u(x,t)$ は変位、 $\partial^2/\partial t^2$ 、 $\partial^2/\partial x^2$ はそれぞれ時間 t 、座標 x による二階微分である。また、 ρ 、 G はそれぞれ密度、剪断弾性係数である。

地表面直下の層から順に番号を付けたとき、第 m 層に関する方程式(1)の解は次のようになる。

$$u_m(x,t) = C_m e^{i(\omega t + kmx)} + D_m e^{i(\omega t - kmx)} \quad (2)$$

ここに、 $k = \sqrt{\rho/G\omega}$ である。

また、上式より剪断応力を求め、第 m 層と第 $m+1$ 層間の連続の条件より、係数 C 、 D に関して次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} C_{m+1} \\ D_{m+1} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1+\alpha_m)e^{ikmH_m} & (1-\alpha_m)e^{-ikmH_m} \\ (1-\alpha_m)e^{ikmH_m} & (1+\alpha_m)e^{-ikmH_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_m \\ D_m \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

$$\alpha_m = \frac{\rho_m V_{s0} \sqrt{1+2h_{m0} f^{nm_i}}}{\rho_{m+1} V_{s_{m+10}} \sqrt{1+2h_{m+10} f^{nm+1_i}}} \quad (4)$$

$$k_m = \frac{\omega}{V_{s0} \sqrt{1+2h_{m0} f^{nm_i}}} \quad (5)$$

また、 H は層厚、 V_{s0} は無減衰時の剪断波速度であり、内部減衰 h は次のように周波数 f の依存性を考慮する。

$$h = h_0 f^n \quad (6)$$

ここに、 h_0 は周波数に依存しないときの減衰係数であり、 n は周波数 f の依存度である。

基盤層を第 N 層とすれば、係数は次のように表される。

$$\begin{bmatrix} C_N \\ D_N \end{bmatrix} = A_{N-1} A_{N-2} \cdots A_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} C_1 \quad (7)$$

ここに、 A_n は式(3)右辺の行列に等しい。

以上より、地表面上の微動記録のフーリエスペクトル $C_1(\omega)$ に対する基盤層上面の入射波スペクトル $z_N(\omega)$ (式(2)の第一項) は、次のようになる。

$$z_N(\omega) = C_N(\omega) = (A_{11}(\omega) + A_{12}(\omega)) C_1(\omega) \quad (8)$$

次に、2地点の基盤層上面の入射波スペクトルが同一になるという条件の下で、双方の地点の地盤物性値の同定手法について最小二乗法に基づいて考えていく。

2地点の基盤層における入射波スペクトルの差の二乗和を評価するために、目的関数 ϵ を次のように定義する。

$$\epsilon = \sum |z_{N1}(\omega) - z_{N2}(\omega)|^2 \quad (9)$$

ここに、 z_{N1} 、 z_{N2} は、それぞれ観測地点1、2の基盤層上面の入射波スペクトルである。 Σ は ω についての総和を、 $\parallel$ は絶対値を意味する。

式(9)の入射波スペクトル z_{N1} 、 z_{N2} は物性値に関して非線形の関係にあるので、これら物性値の近似値 p_0 に対する微小補正量 Δp についてテーラー展開をしてその一次まで考慮する。即ち、入射波スペクトル $z_N(\omega)$ を次のように近似して Δp を線形パラメータとして取り扱う。

$$z_N(\omega) \approx z_{N0} + \sum_i \frac{\partial z_N(\omega)}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (10)$$

ここに、 $z_{N0}(\omega)$ は物性値 p_0 に対する入射波スペクトルであり、 i は物性値番号、 Σ は考慮する物性値についての総和である。また偏微分係数は式(8)より求められる。

ここで、入射波スペクトルの近似式(10)を用いて、式(9)に示した目的関数 ϵ を次のように再定義する。

$$\epsilon = \sum_{\omega} \left| z_{N10}(\omega) + \sum_j \frac{\partial z_{N1}(\omega)}{\partial p_{1j}} \Delta p_{1j} - z_{N20}(\omega) - \sum_i \frac{\partial z_{N2}(\omega)}{\partial p_{2i}} \Delta p_{2i} \right|^2 \quad (11)$$

物性値の微小補正量の最適解は、上式の最小化必要条件より正規方程式をたて、それを解いて求められる。必要条件式は次のようになる。

$$\partial \epsilon / \partial \Delta p_{sr} = 0 \quad (s=1,2 \quad r=1,2,3,\dots) \quad (12)$$

よって、上式より物性値の最適な修正量を求め、次式より物性値を更新して、目的関数 ϵ あるいはその相対変化率が許容値を満たすまで繰り返し計算を行い、2地点の入射波スペクトルの同一化を図る。

$$p^{\text{new}} = p_0 + \Delta p \quad (13)$$

3. 微動観測記録による表層地盤特性の同定

常時微動観測地点を図2に示す。各地点は、芦屋・西宮地区（およそ東西方向2.5km、南北方向4.5km）を250m×250mメッシュに分割して、ほぼその中心に設定し、4日間にわたって地点ごとに観測を行った。全測点数は120である。観測は表面波を誘起しやすいと言われる人工的

ノイズの混入を避けるために夜間（21 時以降）に実施した。観測した波形は速度である。ここでは図 2 に示した観測地点の内 19N1 から 13N2 に至る直線に沿った地点 12 個の記録に同定手法を適用した。ここに表層地盤は洪積層（基盤層）上面より上部の層とした。

観測対象地域では従来よりボーリング調査が行われており、初期モデルの物性値 p_0 として参照した。ただしボーリング調査資料に示された詳細な地盤構造をそのままモデル化せずに簡略化を図り、当地域の主要な地層（表 1 の層要素）を用いて資料に照らして作成した。ここに No.7 の層要素は各地点に共通な基盤層である。ボーリング調査資料を基にして作成した 5 地点の内 3 地点の初期モデルを密度、剪断波速度、層厚の値で表 2 に示す。

同定解析は、以下のように実施した。

- 1) 深さ 30m において 2 地点の入射波を比較した。
- 2) 物性値パラメータとして剪断波速度 V_{s0} と層厚 H を選定し、他の物性値は固定した。
- 3) 剪断波速度は道路橋示方書³⁾に示されている次の N 値との関係式を用いて与えた。
粘性土層の場合： $V_s = 100N^{1/3}$ ($1 \leq N \leq 25$) (14)
砂質土層の場合： $V_s = 80N^{1/3}$ ($1 \leq N \leq 50$) (15)
- 4) 解析対象周波数範囲は 0.0～10.0Hz である。

同定解析から得られた表層地盤の物性値を一部の地点について表 2 に示す。表層地盤全体の厚さは初期値に比較して 3 割程度の変化に止まっている。剪断波速度は層



図 2 常時微動観測地点

厚より小さく 2 割前後である。
解析で対象とした隣接する 2 地点の同定モデルによる深さ 30m の加速度入射波スペクトルの比較図を図 3 に示す。図 3-1（19N2 と 18N1）は山側に位置し 2 地点の層厚が比較的大きく異なる場合の解析例として、図 3-2（16N1 と 15N1）は中間地点の解析例として、そして図 3-3（14N1 と 14N2）は海側に位置する地点の解析例として示した。いずれの結果も良好である。他の地点についても同程度の精度で結果が得られている。対象とした全地点の表層地盤の層厚は表 3 のようになる。図 4 は表 3 の層厚に基づいて描いた表層地盤の断面図である。ここに縦軸は標高を表し、横軸に最も山寄りの地点 19N1 を起点として海側へ向けて測線に沿った距離を採っている。また同図の□印はボーリング調査の結果を参照して初期モデルを作成した地点に付している。2 地点 18N1 と 16N1 間は震度 7 の帯に当たる。この区間の表層地盤の厚さは、一部地域に液状化が発生した海寄りの地盤（15N1、15N2、14N1、14N2）と全体に液状化した人工島内の地点（13N2）を除いた他の地点（山側 2 地点、19N1 と 19N2）に比較して厚い（約 2.5～5.0 倍）ことがわかる。また表 3 には表層

表 1 層要素

No.	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$	h_0	n	土質
1	1.70	100.0	0.10	-0.5	表土
2	1.80	150.0	0.05	-0.5	粘性土
3	1.80	200.0	0.05	-0.5	粘性土
4	1.90	150.0	0.05	-0.5	砂質土
5	1.90	200.0	0.05	-0.5	砂質土
6	1.90	250.0	0.05	-0.5	砂質土
7	1.95	300.0	0.03	-0.5	砂質土

表 2-1 地点 19N2 の初期モデルと同定解析結果

No.	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$		層厚(m)	
		初期値	同定値	初期値	同定値
1	1.70	100.0	94.2	4.0	3.6
2	1.95	300.0	300.0	26.0	26.4

表 2-2 地点 17N2 の初期モデルと同定解析結果

No.	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$		層厚(m)	
		初期値	同定値	初期値	同定値
1	1.70	100.0	83.3	2.0	3.3
2	1.80	150.0	144.6	2.0	2.7
3	1.90	200.0	237.9	6.0	6.4
4	1.90	250.0	256.5	5.0	5.4
5	1.95	300.0	300.0	15.0	12.2

表 2-3 地点 15N1 の初期モデルと同定解析結果

No.	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$		層厚(m)	
		初期値	同定値	初期値	同定値
1	1.70	100.0	75.0	2.0	2.4
2	1.90	150.0	137.7	6.0	5.2
3	1.80	200.0	215.3	9.0	4.2
4	1.95	300.0	300.0	13.0	18.2

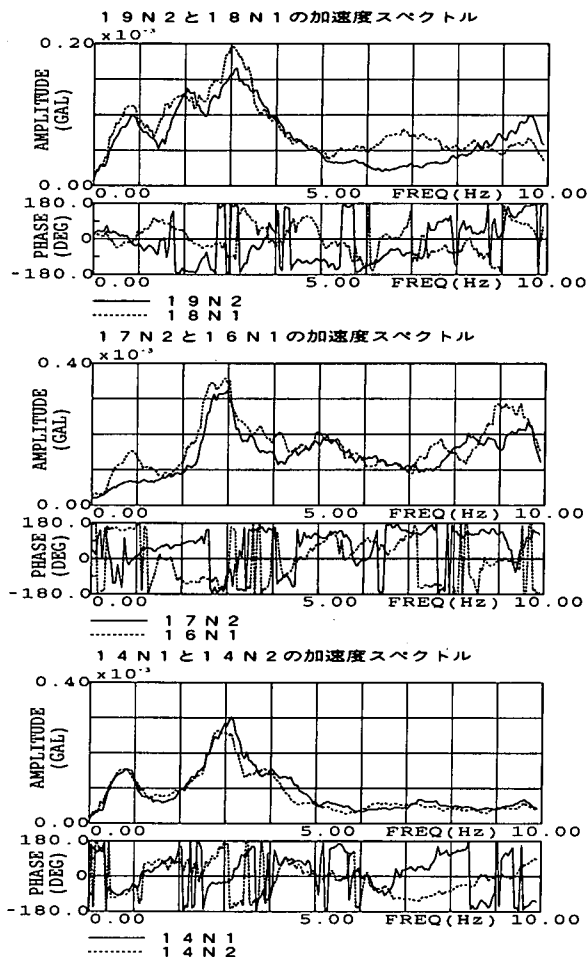


図3 加速度入射波スペクトル

地盤の第一次固有周波数を示しているが、同区間のその値は 3.1Hz～4.0Hz の範囲にある。これらは東京都の地震被害想定⁴⁾にある木造家屋の固有周波数範囲 (1.82Hz～4.0Hz) 内にあり、当該地区にこれを適用すれば、地震時には表層地盤と家屋との間に共振現象が現れ、甚大な被害を招いた原因のひとつと考えられる。

4. おわりに

本研究によって得られた成果を要約すれば、次のようになる。①同定解析から求められた表層地盤の厚さは3割程度の変化に止まり、初期モデルが距離的に離れた地点 (120m～350m) の調査資料を参照して作成されたことを考慮すれば許容できる範囲内の修正量と言える。②震度7の区間に当たる表層地盤は被害の小さかった山側の地盤に比較して相当厚いことがわかった。その一次固有

表3 表層地盤の層厚および第一次固有周波数

No.	地点名	表層地盤層厚(m)	固有周波数(Hz)
1	19N1	3.6	6.6
2	19N2	3.9	6.0
3	18N1	9.1	4.0
4	18N2	11.4	3.9
5	17N1	10.6	3.9
6	17N2	17.8	3.2
7	16N1	17.4	3.1
8	15N1	11.8	3.6
9	15N2	10.7	3.7
10	14N1	20.0	1.9
11	14N2	20.0	1.9
12	13N2	24.5	2.0

周波数は木造家屋の固有周波数の範囲内にあり、その故に地震時には家屋との間に共振現象が現れ、甚大な被害が生じたひとつの原因と考えられる。

ここに提案した同定手法は鉛直アレー地震観測記録を扱う同定手法⁵⁾と比較して更に検証を行う必要があろうかと思われるが、震度7の区間を挟み、層厚に違いが見られる南北方向の測線に沿った表層地盤の特性が把握できたことにより、常時微動記録に対して適用可能であると判断される。

謝辞：本研究を進める上で、(財)電力中央研究所我孫子研究所の佐藤清隆氏にご検討をいただきました。また、神戸の被災地における常時微動観測では、関東学院大学 青木紀男先生、神奈川大学 荏本孝久先生、東京都土木技術研究所 星野務氏、そして各大学の学生諸君の皆様にお世話になりました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1)岩楯敬広:阪神・淡路大震災の地震の概要と土木構造物の被害,総合都市研究 第57号 1995
- 2)中村豊:常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定,鉄道総研報告,1988年4月
- 3)社団法人日本道路協会編:道路橋示方書・同解説,平成6年4月
- 4)東京都防災会議:東京における地震被害の想定に関する研究(手法・提言編),1991
- 5)安藤幸治,岩楯敬広:時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用,土木学会論文集 No.450 /I-20,PP.151～160,1992.7

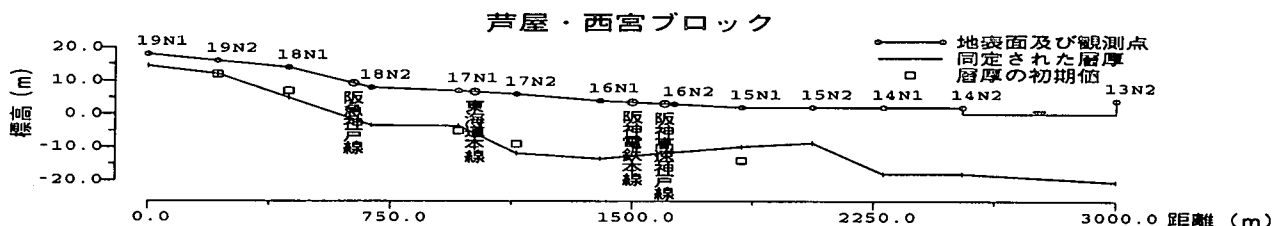


図4 同定解析による表層地盤の断面