## 表層地盤のS波速度構造の同定解析結果に基づいた微動観測データの評価 AN APPROACH TO EVALUATE MICROTREMOR DATA BASED ON THE RESULT OF IDEN-TIFICATION ANALYSIS FOR S-WAVE VELOCITY PROFILE OF SURFACE SOIL DEPOSITS

鈴木 猛康\*, 田中 港\* Takeyasu Suzuki<sup>\*</sup> and Minato Tanaka<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

Identification analyses for a shear wave velocity profile of a subsurface soil deposit, which were carried out at the H12 site of the strong motion observation system "KASSEM", are presented in this paper. The transfer functions derived from the recorded earthquake ground motions due to 4 different earthquake events are adopted as the target functions. A microtremor measurement also was conducted at the same site. The frequency amplification functions determined based on the identified shear wave velocity profiles are compared with the spectral amplitude ratio of a microtremor, the ratio of the horizontal component of Fourier amplitude spectrum to the vertical one.

1. はじめに

表層地盤のS波速度構造は、一般に弾性波探査やPS検層によって推定される。これらの手法は 平均的な地盤の速度構造を与えるが、複雑な速度構造を有する地盤では、物理探査結果をそのま ま用いて表層地盤の地震動増幅特性を再現するのは難しい。これを補完する方法として最近、地 震観測記録より伝達関数を求め、これをターゲットとして最適化手法を用いて、地盤各層のS波 速度およびQ値を同定する手法が提案されている<sup>1),2)</sup>。

本論文では、"KASSEM"センターアレーの表層地盤に注目し、ボーリング柱状図に忠実に従っ て層分割を行い、地表および洪積基盤内の観測地震動から求めた伝達関数をターゲットとしたS 波速度構造の同定解析を試みる。同定された速度構造をN値の分布と比較することにより、結果 の妥当性を検証するとともに、地表加速度の異なる地震波による同定結果より、地盤の非線形特 性について考察する。さらに同定解析で与えられた表層地盤のS波速度構造より、基盤への地震 動の入射に対する地表での周波数応答関数を求め、これを別途実施した常時微動の上下動に対す る水平動のフーリエスペクトル比と比較してみる。

2. 地震観測地点および伝達関数

地震観測地点は、1984年より実施している強震アレー観測システム"KASSEM"のセンターアレ ーを構成するH12地点であり、ボーリング調査より得られた土質構成およびN値の分布、PS検層 より与えられたS波速度構造はFig.1に示す通りである<sup>3)</sup>。伝達関数の解析に用いた地震波は、 Table 1に示す4つの地震の際観測されたものとした。このうちEvent 1,2は地表で30galを超える地 震波であり、これに対してEvent 3,4は地表で10gal前後の比較的小さな地震波である。このように 大きさの異なる地震動の伝達関数をターゲットとして表層地盤各層のS波速度を同定することに より、地盤のせん断剛性の低減を評価することが可能となると考えた。

Event No.	Date of Occurence	Magnitude	Max.Acc.(NS)	Max.Acc.(EW)
1	August 12, 1985	6.4	35.5 (gals)	33.2 (gals)
2	February 6, 1987	6.7	66.6 (gals)	60.7 (gals)
3	May 5, 1986	4.9	7.3 (gals)	6.7 (gals)
4	March 1 1987	47	8 ( (gals)	11.3 (gals)

Table 1 Maximum Accelerations at the H1 Site due to 4 different Earthquake Events

\* (株) 熊谷組技術研究所 (Technical Research & Development Institute, Kumagai Gumi Co., Ltd.)

「新生園日本地蔵「特定スピンウム(1934)

伝達関数の算定に当たっては、後に実施 する同定解析における振動数間隔と一致さ せるため、データ数を16384(データ間隔 0.005秒)とし、Event 1,2ではS波の到達時 刻より81.92秒間、Event 3,4では全収録時 間が30秒前後であることからS波の到達か ら収録終了時間までのデータの前後にゼロ を付加したものとした。伝達関数は、H2 (洪積砂礫層内)に対するH1(地表面下 2m)の増幅倍率として定義する。この際、 H1およびH2のフーリエスペクトルにバ ンド幅0.4でParzen Windowによるウィンド ウ処理を行った。ターゲットとする伝達関 数は、ウィンドウ処理された水平NS方向 成分とEW方向成分の平均伝達関数とした。

Fig.2に4つの地震Eventに対応する伝達 関数を示す。Event1,2の伝達関数は、Event 3,4に対して若干振動数が低い方へシフト しており、表層地盤のせん断剛性の低下、 あるいはS波速度の低減が認められる。



Fig. 1 N-value and V<sub>s</sub> profile at the H12 site



Fig.2 Transfer functions determined based on the observed records due to 4 different earthquakes 3. S波速度構造の同定

S波速度構造の同定に当たっては、S波の鉛直入射による重複反射を仮定し<sup>4)</sup>、目標とする伝達関数に適合する地盤各層のS波速度V<sub>s</sub>を、最適化手法を用いて推定する。最適化手法としては、沢田等<sup>1)</sup>の提案する改良SLP法を採用した。沢田等は第q層に対する第p層の伝達関数を求めているが、ここでは第n層に対する地表の伝達関数を求めるため、伝達関数は(1)式のようになり、同定解析は文献1よりやや簡単になる。

$$\mathbf{H} = \left| \frac{1}{\mathbf{R}_{n-1}(1,1)} \right| \cdot (1)$$
$$[\mathbf{R}_{n-1}] = [\mathbf{S}_{n-1}] [\mathbf{S}_{n-2}] \cdot \cdot \cdot \cdot [\mathbf{S}_{1}] \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

ここで[R<sub>m</sub>]は、第m層の上面と下面の変位とせん断応力を関連づける2x2のマトリックスである。 地震計の埋設してある基盤まで、ボーリング柱状図およびN値の分布を参考にして表層地盤を20 層に分割し、21層目の基盤の上面にH2地震計があると仮定した。なお、基盤を構成する砂礫層のVsは700 m/secである。各層で与えるせん断波速度の初期値はPS検層の結果とした。また、減衰に関連するQ値については周波数依存性を考慮し、fを周波数として以下のように与えた。

上式の定数 $Q_0$ およびpは、すべての層で $Q_0 = 9$ 、p = 0.35の一定値とし、減衰に関する同定は行っていない。これらの定数は、Event 1に関する同定解析において、 $Q_0$ およびpを変えてパラメトリックスタディーを実施して決定したものである。







Fig.3(b) Comparison of transfer functions obtained from the observation with the identified one S波速度構造の同定解析は、それぞれ4つのEventの伝達関数をターゲットとして実施した。タ ーゲットとした伝達関数と同定解析の終了時点における同定モデルの伝達関数を、各地震Event毎 に比較してFig.3に示した。Event 3,4についてはターゲットとした伝達関数の高次振動成分が滑ら かでないため、Event 1,2のケースと比較して多少同定の精度は悪いものの、10 Hzまでに含まれる 5つのピークに良く追随した同定結果となっている。

Fig.4に同定されたS波速度構造を示す。 図中に1 点鎖線で示されているのがPS検 層結果である。PS検層の結果は、深度約 25mまでは同定解析結果の平均的な値を示 しているが、これ以深約40mまではどの Eventの同定解析結果よりも低い速度を示 していることがわかる。とくにEvent 3.4に おいて同定されたGL.-37~38mの層のS波 速度は400 m/secを超えており、この層で はEvent 1,2でもPS検層結果よりはるかに 大きな値を同定している。この層はN値の 分布から見ると、前後の層に対して急にN 値が増大する箇所であり、また全体を通し ても同定結果はN価の分布と良い相関を示 している。従って、解析結果は妥当なもの と判断される。

地表面加速度の比較的大きいEvent 1,2と 小さいEvent 3,4から推定したS波速度構造 を比較すると、深度15m以浅では両者の関 係に顕著な傾向は認められない。しかし、





これより深度約40mまでの区間では、明らかにEvent 1,2から同定されたS波速度がEvent 3,4に比べ て最大で10~15%程度小さいことが認められる。また地表加速度の最も大きかったEvent 2のケー スをEvent 1のケースと比較しても、Event 2で得られたS波速度はEvent 1のケースよりもやや小さ く、地震動が大きいほどS波速度の低減が大きいこと認められた。S波速度の低減は、最大で10~ 15%であることから、これをせん断弾性係数の低減にすると20~30%程度となり、予想以上に大 きい結果となった。ただし、減衰についてはQ値はどのEventでも同一としているため、S波速度 の低減を多少過大に評価している可能性がある。 4. 常時微動観測と同定解析結果の比較

常時微動が地盤の卓越振動と密接に関連していることは周知の事実であるが、常時微動観測結 果を定量的評価に用いるまでには至っていない。筆者らは釧路市において微動観測を実施し、中 村等の方法<sup>5)</sup>に従い、微動の上下動成分に対する水平動成分のフーリエスペクトル比として観測 結果を整理した結果、このスペクトル比が低次で表層地盤の周波数応答関数の1/2に近似できると 考えると、釧路沖地震の際の釧路市の震動および被害がある程度説明できることを示した<sup>6),7</sup>。 ここでは、常時微動のスペクトル比がどのような物理的な意味を持つかを具体的に示す目的で、 同定解析によって地下のS波速度構造が明らかなH12地点で微動観測を行ってスペクトル比を求め、 これと同定されたS波速度構造に基づいて決定された周波数応答関数を比較することにする。

常時微動観測は1993年11月に、宮城県柴田町で実施している"KASSEM"センターアレーを構成 する4点で実施した。サンプリング周波数100 Hzで、サンプリング数8192のデータを3方向(水 平2、上下1)同時に収録した。測定は同一地点で3回以上行い、この中で明らかにある特定の 振動源によると思われるデータは削除した。このようにして収録された個々の微動観測データの フーリエスペクトルに対して、バンド幅0.8のParzen Windowで平滑化処理をし、さらに各方向毎 に平均化して、平均スペクトルの上下成分に対する水平成分のスペクトル比を算出した。

Fig.5にH12地点における平均スペクトルを方向別に示す。上下方向成分は約3Hzをピークとした滑らかな形状を呈しており、微動の振動源が主として交通振動であることを示唆している。これに対して水平方向成分のスペクトルは、上下方向に比べてやや凹凸があり、3Hzのみならず、1~2および4~5Hzにもピークが存在することが認められ、この傾向はこれまでに実施した微動観測の結果と一致している<sup>7)</sup>。





Fig.5の各方向別のスペクトルよりスペクトル比を求め、また同定されたH12地点のS波速度構造に基づいて、次式を用いて各地震Event毎に周波数応答関数F<sub>amp</sub>(ω)をもとめ、これらをまとめてFig.6に示す。

 $F_{amp}(\omega) = \frac{2}{\sqrt{|R_{n-1}(1,1)|^2 + |R_{n-1}(2,1)/G_nk_n|^2}} \cdot \cdot \cdot \cdot (4)$ 

ここで、 $G_n$ および $k_n$ はそれぞれn層(基盤)のせん断弾性係数および波数である。図中にはスペクトル比を2倍した関数もプロットしているが、基本せん断振動に関しては、このスペクトル比の2倍と理論周波数応答関数とは良く一致していることがわかる。筆者らはスペクトル比SR( $\omega$ )と $F_{amp}(\omega)$ の関係を $F_{amp}(\omega) = 2 \cdot SR(\omega)$ と仮定したが<sup>6),7)</sup>、Fig.6を見るかぎりこのような近似が基本せん断振動領域については実務上使えそうである。常時微動のスペクトル比の解釈ついては、

S波の重複反射とする考え方<sup>5)</sup>と、Rayleigh波とする考え方<sup>8)</sup>があるが、どちらにしてもスペクトル比が地盤の卓越振動を良く反映していることは明らかである。



Fig.6 Comparison between frequency amplification functions determined based on identification analyses and spectral amplification ratios of microtremor observed at the H12 Site

5.まとめ

本論文で得られた結論を以下にまとめる。

1) "KASSEM"センターアレーH12地点のS波速度構造を同定した結果、得られたS波速度分布は N値と良い相関を示し、また地表面加速度が大きいほど地盤のせん断剛性の低下が著しいことが 認められた。

2) 同定されたS波速度構造に基づいて決定された周波数応答関数は、常時微動の上下動成分に 対する水平動成分のスペクトル比と基本せん断振動領域で良い相関を示した。

今後、さらに別の地震観測地点でも同様な解析・比較を実施し、沖積地盤の非線形挙動や減衰 の周波数依存性についても検討を行いたい。またその上で、常時微動のスペクトル比の意味やそ の工学的利用法について考察を行う予定である。

6. 参考文献

1)沢田他: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, 上木学会論文集, Vol.I-19, No.446, pp.205-213, 1992

2)武村他:堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価,日本建築学会構造系論文報告集,No.446, pp.1-11, 1993

3)清水他:KASSEM設置点における地盤定数と観測地震波の解析,熊谷技報, No.39, pp.111-121, 1986
4) Abe, K. et al.: Estimation of Amplification Spectra for P and SV Waves, Proc. 2nd Int. Conf. Recent Ad. Geotech. Earthq. Engrg. Soil Dyn., St. Louis, Missouri, pp.1229-1235, 1991

5) 中村, 滝沢:常時微動による表層層厚と基盤および表層地盤のS波速度の推定, 鉄道総研報告, Vol.4, No.9, pp.29-35, 1990

6)鈴木,足立,田中:釧路市の表層地盤構造と微動観測から推定された卓越振動について,第23回地震工 学研究発表会講演概要集,pp.371-374,1993

7) Suzuki, T. et al. : Application of Microtremor Measurements to the Estimation of Earthquake Ground Motions in Kushiro City during the Kushiro-oki Earthquake of January 15, 1993, Earthq. Engrg. & Struc. Dyn., 1994 (to be published)

8)時松,宮寺:短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係,日本建築学会構造系論文報告集,No.439, pp.81-87, 1992