

(36) 多点地震記録から地盤の卓越周期と非線形特性を求める手法

東京大学生産技術研究所 正員 ○童 華南
東京大学生産技術研究所 正員 山崎 文雄

1. はじめに

表層地盤の卓越周期の評価は、従来の S 波速度、層厚、密度などのボーリングと PS 検層のデータを用いて算出する手法や、中村により提案された微動測定の水動と上下動のスペクトル振幅比から表層地盤の応答特性を推定する手法^{1),2)}などが考えられる。しかし、ボーリングデータの N 値から弾性波速度を推定する場合、大きな誤差を避けられない、パラメータの誤差以外にも解析モデルがどの程度地盤を表現できるかにも問題がある。微動測定法は、その簡便性と有用性が評価されているが、表面波が微動の主要成分であれば、表面波と S 波の卓越周期との関係が離れることもあり、地盤の卓越周期を評価する場合、適用できる地盤と適用できない地盤がある。地震記録による回帰手法もあるが、サトウ表層地盤の卓越周期を絞った詳細な検討はこれまであまりされなかった。兵庫県南部地震の神戸における強い地震動と微動測定による地盤震動は、表層地盤の挙動が同じ地点であっても、大きく異なり、同じ卓越周期で説明できない。それぞれのレベルの地震動に追従する複雑な地震時の地盤特性の評価においては、上述の従来の手法が適用できない。

本研究は、多点地震記録を用いる新手法を提案する。この手法においては、表層地盤の特性中の卓越周期だけを目的に絞り、一定の広がり観測地域での多点記録のフーリエスペクトルを平均操作して得たものをこの地震とこの観測地域の基準スペクトルとする。観測点の地盤卓越周期はその観測点のフーリエスペクトルと観測地域の基準スペクトルとの比から求める。新手法の応用例として、東京ガスにより関東地域の 31 箇所の複数の地震による記録を用い、地盤の周期特性を求め、得られた安定な卓越周期と僅かな地震動強さの差にも追従する非線形形状から、新手法の有効性を示す。

2. 多点記録の震源特性と伝播経路特性

地震 i の観測点 j の波形は振動数領域のスペクトルとして、地震の発振機構 $S_i(f)$ 、伝播経路 $T(\Delta_{ij}, f)$ と表層地盤の応答特性 $G_j(f)$ の 3 つの部分に分けて考察しよう。

$$F_{ij}(f) = S_i(f)T(\Delta_{ij}, f)G_j(f) \quad (1)$$

まず、ある地震だけを取り上げるときに、式(1)の i がなくなり、各記録に含まれている地震の発振機構 $S(f)$ が同一なものである。

伝播経路の $T(\Delta_{ij}, f)$ は、観測点 $j(j=1, 2, \dots)$ の分布に大きく関係する。震源から見て一ヶ所に固まった観測点であれば(例えば、広がりが 300m を有する東京大学生産技術研究所の千葉71-), 各記録に含まれる伝播経路の影響が同じものである。広域の観測網(例えば、気象庁の JMA87 型地震計観測網)では、各記録にある $T(\Delta_{ij}, f)$ は同一視することができない。

しかし、振動数依存性だけを注目する場合、震源機構と表層地盤の特性の起伏と比較すれば、伝播経路の T の変化が緩やかなものである。したがって、図 1 に示した東京ガスの警報システム(SIGNAL)³⁾のような直径 100km 以内、平野に広がっている観測地域において、 T の振動数 f による変化を無視し

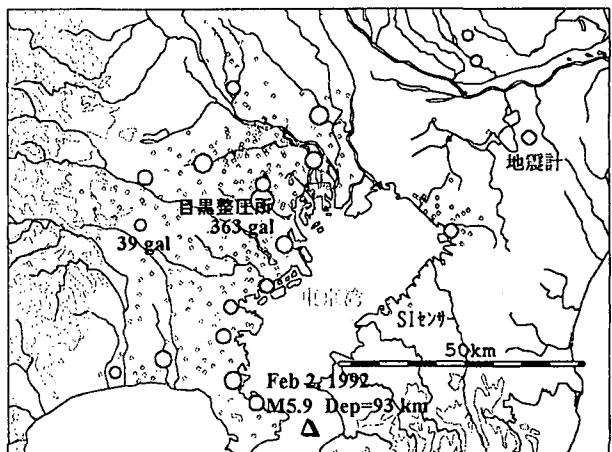


図 1 東京ガス SIGNAL 観測網。小さいダイヤモンドがセンサー、○の大きさが 92/2/2 地震の地震計による最大加速度

ても地盤の振動数特性の考察には大きな支障がないと思われる。

図1に示した観測地域では、各観測点の表層地盤卓越周期がばらついているとすれば、式(1)の $G_j(f)$ は一定の振動数領域では、山と谷が一様分布を呈することが期待できる。よって、次のように多点記録による特定の地震の特定の観測地域の基準スペクトル $R(f)$ を定義する。

$$R(f) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{F_j(f)}{\bar{F}_j} \quad (2)$$

ここでは、 $F_j(f)$ は観測点 j の記録のフーリエ振幅スペクトルであり、 $\bar{F}_j$ は同スペクトル振幅の0.07Hz～23Hz振動数領域での平均値であり、 n は特定地震の観測地域での記録の水平成分の総数である。 $R(f)$ は取り入れた記録の水平成分の共通の性格をもつものとなる。 $\bar{F}_j$ で割ることによって、震源に近い点や揺れやすい観測点が抑制され、震源から遠く離れている点やあまり揺れなかった硬い地盤が増幅される。この平均操作の役割は各観測点の表層地盤の振動数依存特性を平等に取り入れ、各点の特性の相殺を最大限に実現させることである。したがって、異なる地盤の記録は数があれば、 $R(f)$ の振動数依存性は地震の発振機構と伝播経路のものであり、主に地震の発振機構の性格を表す。

3. 表層地盤の振動数特性

特定の地震に対して、地震の発振機構と伝播経路の振動数特性だけをもつ $R(f)$ があれば、各観測点の表層地盤の振動数特性 $g_j(f)$ は式(3)から得られる。

$$g'_j(f) = \frac{F_j(f)}{R(f)} \Rightarrow g'_{jxy} = \sqrt{g'_{jx}(f)^2 + g'_{jy}(f)^2} \Rightarrow g_j(f) = \frac{g'_j(f)}{\bar{g}_j} \quad (3)$$

ここでは $F_j(f)$ と $R(f)$ は式(1)と同じ、 $\bar{g}_j$ は $g'_j(f)$ の0.07Hz～23Hz振動数領域での平均値である。各観測点の x と y の2つの水平成分を用いて、観測点 j の $g_j(f)$ を算出する。式(3)の $\bar{g}_j$ で割る理由は、このように標準化された $g_j(f)$ は、数学の角度から見れば平均値が1である f の関数であり、工学の角度から見れば表層地盤の増幅特性ではなく、単純な振動数特性となる。すなわち、観測点 j の地盤の増幅特性は、 $m_j \cdot g_j(f)$ の形で表し、 $g_j(f)$ ともう一つのスケール量 m_j に2つ分離して、 m_j の求める方法は本研究の後続課題とする。

以上の $R(f)$ および $g_j(f)$ の定義から分かるように、 $g_j(f)$ が精度よく表層地盤の振動数特性を表すには、使用する多点記録に対して次の2点が考慮すべきである。

1. 同じ地盤特性ばかりの記録なら、共通な特性が抽出されないで、多点記録は数多くだけでなく、異なる地盤特性の観測点をバランスよく取り入れる。
2. 遠く離れている観測点の記録を一緒に使用すると、 $g_j(f)$ には地盤の特性だけでなく、伝播経路の振動数特性の差も混入するので、それを避けるため、震源から見た観測点の分布に留意する必要がある。

以上の2点が互いに制約し、実際に入手できるデータの制限があることと、伝播経路の振動数依存性が地盤と比べて小さいことを考えれば、この手法の使用においては、観測地域が狭すぎ、あるいは離れていても地盤特性が類似するデータセットを避ける必要がある。

4. 新手法から得られた地盤の非線形性状

複数の地震の多点記録を用い、新しい手法で地震 i に対応する観測点 j の $g_{ij}(f)$ を得ることができる。一つの観測点において、土の非線形性状によって、表層地盤の振動数特性は地震動の強さにより変動することが予想される。図2は東京ガスの地震時警報システムの31箇所の地震計の数回の地震記録から求めた目黒観測点の $g_{ij}(f)$ である。図の横軸は、振動数ではなく、地盤特性において慣用の周期(対数)であり、計算時の0.07Hz～23Hzの帯域から注目する領域を拡大したものである。図の凡例には地震 i の日付、フーリエ振幅の

平均値 $\bar{g}_i$ (cm/sec) および対応する 1 次卓越周期 (sec) をリストアップしてある。図に示したように、フーリエスペクトルの平均値が 19.4cm/sec (2 成分合成最大加速度 363gal, 計測 SI 値 6kine) である 92 年 2 月 2 日の地震動の場合、この観測点の表層地盤の 1 次卓越周期が 0.32sec になっていたのに対して、フーリエスペクトルの平均値が 0.8cm/sec (2 成分合成最大加速度 19gal, 計測 SI 値 1kine) である 94 年 10 月 4 日の地震動の場合、同じ観測点なのに、1 次卓越周期が 0.25sec となっていた。その非線形性質は、1 次モードに限らず、2 次モードにも克明に出ている。従来の研究で、地盤の非線形性の影響により固有周期の伸びが報告されたが、新手法のように細かく定量的に示すことがなかった。また、92 年 2 月 2 日の地震では、2 次モードは 1 次モードより突出してある。

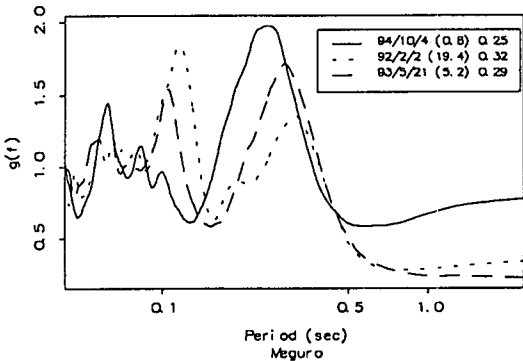


図 2 目黒観測点の表層地盤卓越周期

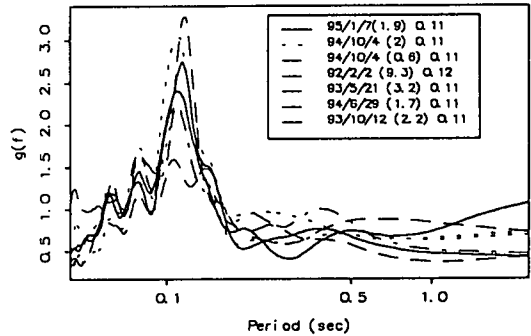


図 3 保谷観測点の表層地盤卓越周期

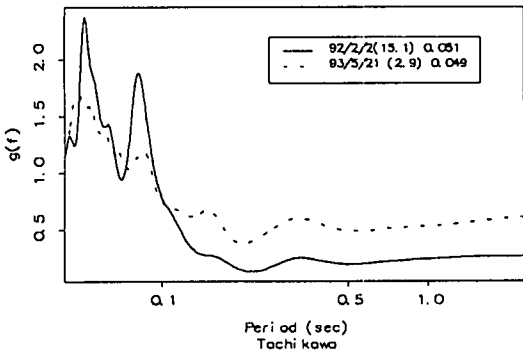


図 4 立川観測点の表層地盤卓越周期

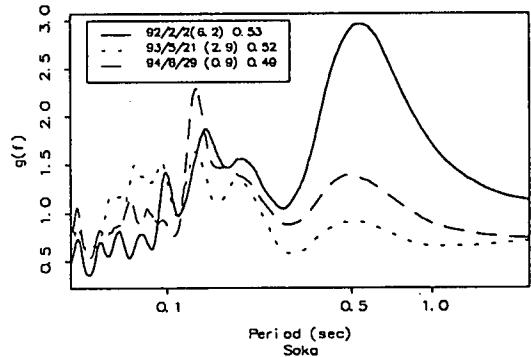


図 5 草加観測点の表層地盤卓越周期

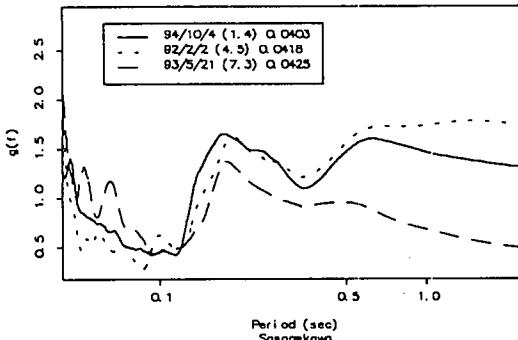


図 6 笹目川観測点の表層地盤卓越周期

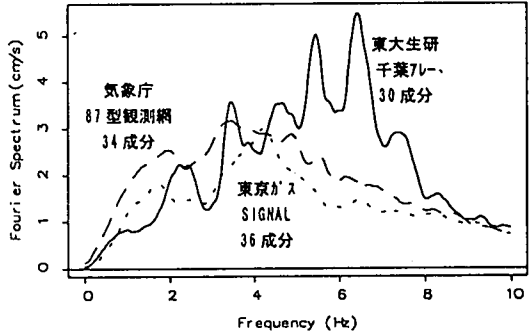


図 7 3つの観測地域の 92/2/2 地震の基準スペクトル

図3～6は同じ観測地域の4の観測点の $g_y(f)$ を示したものである。いずれも例外なく表層地盤の卓越周期がはっきり現れ、非線形による周期の伸びが地震動の強弱に対応している。また、表層地盤の周期特性が地震動つよいほど、1次モード以外のモードが励起されやすい傾向が見られる。

5. 結果から新手法の考察

新手法の式(2)と(3)には幾つかの仮定を前提としており、以上で得られた結果から、それらの仮定が満たされたかどうか振替えて検討すべきである。図2～6に示した各点地盤の卓越周期から分かるように、用いた東京ガスの多点記録の各観測点の表層地盤の卓越周期は一ヶ所に固まっていない。すなわち、各観測点の表層地盤振動数特性が互いに相殺されることが保証され、式(2)で得られた $R(f)$ はその地震の観測地域の基準スペクトルとすることが妥当である。

比較するために、92年2月2日の地震を取り上げ、300mの東京大学生産技術研究所の千葉高密度7L-のデータセット、100kmの東京ガス観測網および気象庁のJMA87観測網(データが400kmの地域から選出)を別々に計算した $R(f)$ は図7に示す。図から分かるように、400kmの広がりとは100kmの広がりでは得られた基準スペクトルはかなり近似しており、千葉7L-のような局地ではなければ、新手法は広域観測網への応用が十分な精度が期待できる。

図に示した各観測点の周期特性と非線形形状は地盤の応答特性を知る上で、極めて重要な情報である。このような起伏の激しいサイトの特性であれば、広域のデータセットを使用して混入した伝播経路の影響があっても、実用上は大きな問題にならないと考えられる。

6. 結論

本研究では、多点地震記録を用いて表層地盤の振動数特性を求める新手法を提案した。また東京ガスの多点記録を用いた結果、各観測点と各地震とも安定な地盤周期特性が得られ、地震動強さの僅かな変化にも追従する非線形の対応から、手法の信頼性と精度が立証された。この方法の使用により、地盤の動的特性に対して、以前よりずっと精密な検証を行うことが可能となる。

新手法の応用結果から分かるように、普通の表層地盤の卓越周期が地震動強さによって大きく変化するものであり、時には地盤の1次モードにだけでなく、地震によって2次モードに強く左右されることもありうる。したがって、異なる地震の表層地盤の応答特性を同じものとして期待することには無理があり、これを前提とした表層地盤の振動数特性を求める方法であれば、地震動強さを一定のレベルに設定しない限り、成り立たないと思われる。

本文で示した地盤の周期特性の診断方法は、地震によって生じた固有周期の差を克明に検出できるので、地震動応答特性が微動、中小地震および強い地震動の場合における変動を解明するための有力な手段と思われる。使用する多点記録は、同じ地盤特性のものばかりでなければ、多くの観測網のデータを利用することが可能である。現時点では、データセットの入手が一つの難点であるが、発表された科学技術庁の地震後にインターネットに発信する強震観測網の整備計画が実現すれば、新手法が大いに活用できると確信する。

参考文献

1. 中村豊・上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム講演集、pp265-270, 1986。
2. 大町達夫・他：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用、土木論文集 No. 489/I-27, PP251-260, 1994。
3. 翠川三郎：強震時に見られる地盤特性の非線形、地震、第46巻、pp207-216, 1993。
4. 川瀬博：気象庁87型強震記録による北海道周辺の地震の震源特性と道内気象台のサイト特性、第9回日本地震工学シンポジウム、Volume1, pp415-420, 1994。
5. 山崎文雄・他：都市ガス導管網の地震時警報システムSIGNALの開発、第22回地盤震動シンポジウム、pp85-pp94, 1994。