

地表面における常時微動の波形を用いた地盤の減衰定数の評価法

A METHOD OF EVALUATING DAMPING RATIO OF GROUND

BY USING MICROTREMOR RECORD AT SURFACE

\*                   \*\*                   \*\*\*  
北浦 勝      池本敏和      日比野友亮

By Masaru KITAURA, Toshikazu IKEMOTO and Tomoaki HIBINO

It is an important problem to predict the dynamic properties of surface layers during earthquakes. One of methods to predict them is a microtremor measurement on the surface ground. There are two parameters in treating ground vibration problems: one is natural period and the other is damping ratio. It is indicated that the natural period of surface ground in microtremor measurement is related to that during earthquakes. However, the damping ratio has not been evaluated by using microtremor measurement.

In this paper, the authors present a new method which evaluates a damping ratio by using microtremor measurement. The method is applied to measured microtremor waves at alluvial plain. In analytical results, it is indicated that the damping ratio of surface ground is obtained using the method.

1. まえがき

地震による構造物の被害と表層地盤の振動特性との関係は、これまでに多くの研究者らによって論じられている<sup>1)</sup>。それらの論文の多くは、表層地盤の振動特性には固有周期、減衰定数、せん断波速度などの要因が互いに影響を及ぼし合っていることを表わしている。地盤動特性のパラメタの推定の現況を見てみると、地盤の固有周期に関しては比較的正確に推定する方法が数多く提案されており、例えば常時微動から求まる固有周期は道路橋設計示方書・同解説V耐震設計編<sup>2)</sup>に使われている。このように従来は地盤の良否を固有周期のみで判定していた。しかし地震時における地盤の応答特性を総合的に把握するためには、固有周期とともに減衰定数を知る必要がある。地盤の減衰定数を推定する方法には共振法や孔内動載荷試験の測定方法が挙げられる。これらの方法は測定設備が大がかりなため、一地点の測定でも多大な費用と労力を要する。また、これらの方法を用いて求まる地盤の減衰定数には地震時に重要な表層地盤から基盤層への波動逸散性は含まれていない。河村は地震観測記録から求めた伝達関数を、質点系モデルを用いた理論解から求まる伝達関数に近似するというスペクトルフィッティング法により表層地盤の減衰特性を推定している<sup>3)</sup>。木下は厚い堆積層におけるS波の内部減衰特性と表層地盤系の逸散減衰特性とを地盤の検層資料と地震記録に基づ

---

\* 工博 金沢大学助教授 工学部建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)  
\*\* 金沢大学技官 工学部建設工学科 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)  
\*\*\* 金沢大学大学院修士課程 (〒920 金沢市小立野2丁目40-20)

いて推定を行っている<sup>4)</sup>。また、太田は低ひずみ領域から高ひずみ領域に至る履歴減衰特性を含めた減衰特性の評価を異なる3種類の方法から求め<sup>5)</sup>、興味ある結果を得ている。

これまでに著者らは測定が容易かつ経済的な地表面で得られる常時微動を利用し、地盤の減衰定数を推定する方法に関して検討を加えてきた<sup>6)</sup>。本研究ではこれまでに得られた成果をまとめるとともに、新たに地盤の減衰定数を推定する方法を提案する。

## 2. 常時微動の測定地点と地質

常時微動の測定地点はFig.1 (a)に示される21地点である。測定地点としては既に建設省北陸地方建設局によりボーリングデータが調査されており<sup>7)</sup>、かつ沖積層が表層を覆っている地点を選んだ。Fig.1 (a)におけるA-A' Lineの断面<sup>8)</sup>を測定地点2, 4, 9のボーリングデータと共に同図(b)に示す。同図(b)には $N$ 値とせん断波速度の関係式から<sup>9)</sup>求められる各層におけるせん断波速度も示されている。この図から、測定に選ばれた地点は沖積層厚さが10~70mであり、扇状地にあたることがわかる。因みに測定地点は道路橋設計示方書に従うところの地盤種別に分類するとすべてⅢ, Ⅳ種地盤に属している。測定、解析方法については文献10)に詳細に記述されているため、ここでは簡単に説明する。測定にはピックアップにサーボ型加速度計(明石製, V401-BS型, 固有振動数490 Hz)を用い、信号をアンプ(豊田工機製, AA3004型)で増幅し、データレコーダ(TEAC製, R-81型)に収録する。測定は交通量の少ない午前0時より午前4時ごろにかけて行った。解析ではデータレコーダの記録をローパスフィルタで高振動数成分(20Hz以上)を除去したのち計算機に入力する。このとき0.02秒×1024個の約20秒間を解析時間としている。ところで常時微動の計測には速度計が一般には使われている。これは主としてノイズ成分より成る振動数領域を速度計は比較的感知しにくいからである。しかし本研究で提案する減衰定数の評価法では応答スペクトルを用いているため、入力として加速度を採用する方がその物理的意味を明確にできることから、ここでは加速度計を使用している。

## 3. 地質の減衰性に関する考察

### 3-1 表層地盤の減衰性

表層地盤付近において考えられる地盤の減衰特性の概念図をFig.2に表わす。図中 $h_n$ ,  $h_n$ ,  $h_d$ はそれぞれ、表層地盤での内部減衰、履歴減衰と、表層地盤から基盤層へ波動が逸散することにより生ずる逸散減衰を表わしている。基盤の明確な定義は難しいが、 $N$ 値50より深い層を基盤層と考へても工学的には問題がないと言われているため、本報告でも同様の仮定を設ける。なお基盤を剛であると考えると、表層地盤から基盤層への逸散減衰を取り扱うことができない。そこで一般には逸散

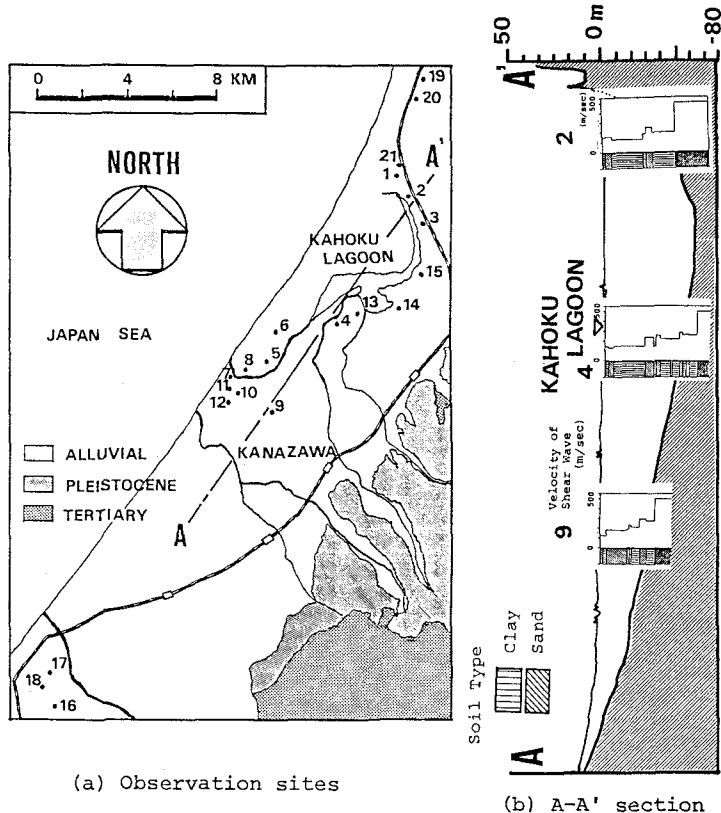


Fig.1 The geology and the observation sites of microtremor

減衰を等価な内部減衰で置き換える等価逸散減衰定数が使われることが多いので<sup>11)</sup>、本研究でもそのように取り扱う。またひずみ振幅が $10^{-6}$ 程度の常時微動を対象とするため、表層地盤の履歴減衰は考えない。従ってここでは、表層地盤中の内部減衰と、表層地盤から基盤層への逸散減衰とを同時に考えていることになる。

### 3-2 1自由度系と考えた表層地盤の減衰特性

本章では、地盤を1自由度系にモデル化した場合に、減衰定数はどれほどの大きさに評価されるかを予備的に検討する。このとき、重複反射理論には内部減衰や逸散減衰が比較的精度よく組み込まれているので、この理論を用いて得られる地盤の応答を真の常時微動波形であると仮定する。

Fig.3 に減衰定数評価法の概略を示す。基盤面での常時微動の波形をホワイトノイズに近い波であるとする。ホワイトノイズを用いる理由は、(1)対象とした測定地盤の露頭地盤において測定とほぼ同時期に常時微動を測定した結果、振動数特性が比較的ホワイトノイズに近い特性を示したこと (Fig.4 参照)、(2)振動系にホワイトノイズを入力させると、系は系固有の振動数特性 (いわゆる振動数伝達関数) を示すこと、(3)従って入力振動数特性による影響を考慮することなく、系の応答波形のみから系の減衰性を評価しうること、による。重複反射理論を用いてこの波に対する地表面での応答波形すなわち地表面での常時微動波を求める。また同じ地盤に対して、表層地盤を1自由度系と仮定した場合の応答波形も線形加速度法を用いて求める。このとき1自由度系の固有振動数 $f_0$ には、重複反射理論から求まる地盤の卓越振動数を用いる。また、1自由度系の減衰定数 $h$ は0.01から0.6まで逐次変化させる。従って1自由度系の応答すなわち地表面での模擬常時微動の波形が変

化させた減衰定数の数だけ求まることになる。次に重複反射理論から求まる地表面での常時微動と、模擬常時微動のそれぞれを入力として、加速度応答スペクトルとそのR.M.S.値を求める。両R.M.S.の値の差の2乗が最小となる時の1自由度系の減衰定数を表層地盤の減衰定数とする。従って、表層地盤でのボーリングデータを用いて多層地盤を扱う重複反射理論の結果と、単純な1自由度系の応答の結果との比較から、多層地盤を振動論的に取り扱う場合の減衰定数が評価されることになる。ここで用いた重複反射理論には表層地盤の内部減衰を各層のせん断波速度と内部減衰との関係式<sup>11)</sup>を用いて求めており、また最下層における逸散減衰が既に考慮されているため、このようにして求まる減衰は1自由度系に置き換えられた内部減衰+逸散減衰を表わすことがわかる。従って、この減衰を表層地盤を1自由度系にモデル化したときの減衰定数の真値であるとみなし、以下に述べる評価法の結果を検討をする際に用いる。Table 1 に得られた減衰定数を示す。評価された表層地盤の減衰定数の値は0.02~0.08程度の間分布していることがわかる。

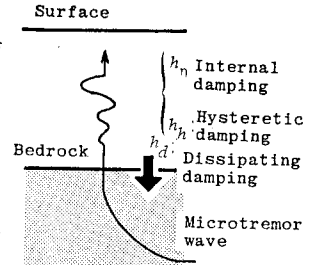


Fig.2 Damping ratio in surface ground

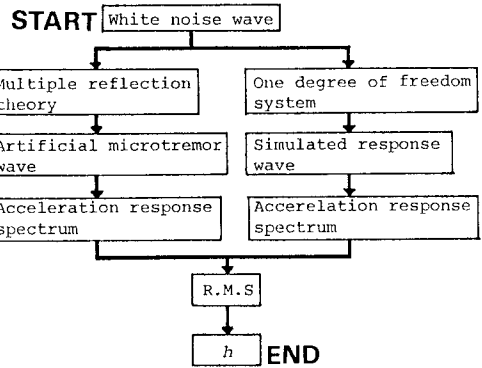


Fig.3 Flow chart of the method

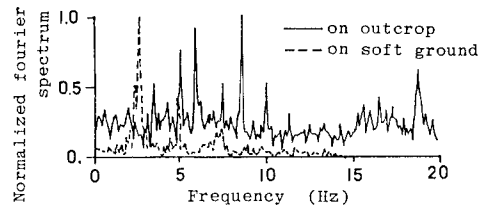


Fig.4 Fourier spectra

Table 1 Analytical results by using the method (see Fig.3)

Observation sites No.	Damping ratio $h$
1	0.05
2	0.02
3	0.05
4	0.02
5	0.07
6	0.02
7	0.05
8	0.07
9	0.02
10	0.04
11	0.03
12	0.04
13	0.04
14	0.07
15	0.05
16	0.05
17	0.08
18	0.04
19	0.05
20	0.03
21	0.04

4. 地表面における常時微動から推定した地盤の減衰定数

4-1 基盤での常時微動の最大振幅値を未知とする評価法

前章では地盤の減衰特性を波動論と

振動論の両側面から考え、両者の比較・検討を行った。従ってボーリングデータが既知であることを前提としていたが、本章ではそれがわからないとし、地表面で得られる常時微動の加速度波形から地盤の減衰定数を評価する方法を提案する。評価方法の詳細に関しては文献6)に譲り、概要をFig.5に示す。本方法では地盤減衰定数の評価が、1) 基盤における波形(ホワイトノイズ)を発生する、2) ホワイトノイズを入力とする1自由度系の応答波の振幅の最大値と、常時微動の振幅の最大値とを等しくする(基準化と呼ぶ)、3) 両者の加速度応答スペクトルの形状を比較することによって地盤の減衰定数を求める、のステップで行われる。以下この評価方法を評価法Aと称す。

まず評価法Aの精度を確かめるために、1自由度系の固有振動数と減衰定数を既知とする応答波(これを模擬常時微動波と称す)を作成し、その波を地表面で得られた常時微動の波と考え、評価法Aを用いて逆に減衰定数を求めた。その結果をFig.6に示す。同図は固有振動数をパラメタにとり、縦軸に求まる減衰定数を、横軸に仮定した減衰定数を表わしている。固有振動数に関係なく地盤の減衰定数が、ほぼ45°の直線沿いに求まることから、評価法Aの精度が良いことがわかる。

次に、評価法Aを実際に地表面で観測された常時微動に適用した結果をTable 2に示す。Table 2を見ると、評価法Aを用いて求まる地盤の減衰定数は3-2の方法で得られた結果と比べ高い値を示す傾向にあることがわかる。すなわち、減衰定数の値が最も大きい場合0.6と現実の地盤では考えられない大きい値を示している。

この理由として、Fig.7(b)に示されているような常時微動の信号に含まれるノイズが原因でないかと考えた。地盤のフィルター作用を十分に受けた表層地盤の特性を隠し持っている純粋な信号を太線で、他に計測

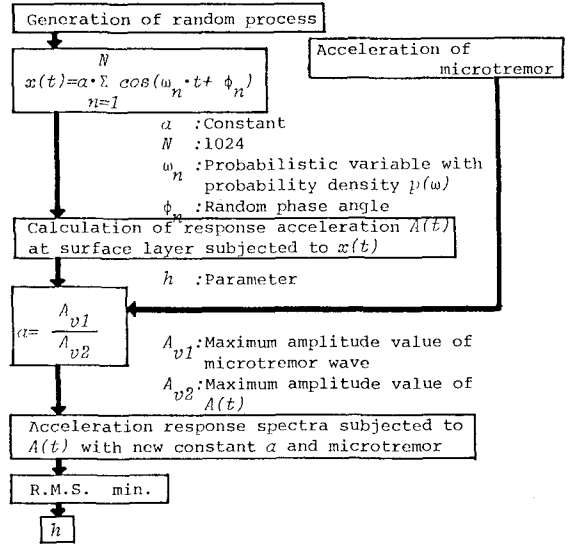


Fig.5 Flow chart of method A

Table 2 Analytical results by using method A and method B

Observation sites No.	Method A	Method B
1	0.60	0.07
2	0.23	0.02
3	0.48	0.04
4	0.35	0.01
5	0.59	0.08
6	0.50	0.04
7	0.09	0.03
8	0.36	0.03
9	0.45	0.02
10	0.18	0.03
11	0.37	0.03
12	0.59	0.03
13	0.27	0.02
14	0.43	0.03
15	0.01	0.03
16	0.32	0.01
17	0.57	0.06
18	0.55	0.03
19	0.22	0.06
20	0.07	0.02
21	0.60	0.04

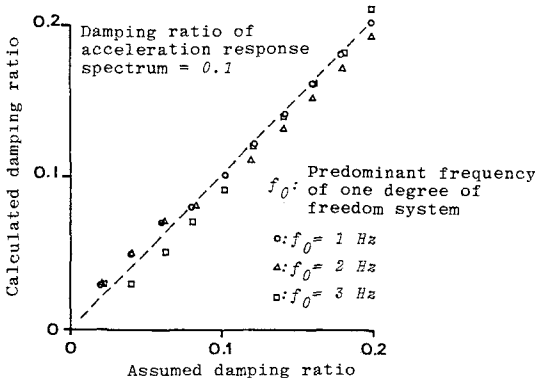


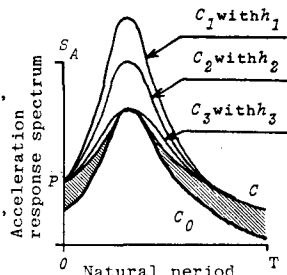
Fig.6 Comparison with calculated damping ratio by using method A and assumed damping ratio

器類によって発生させられた表層地盤の特性以外の不必要な信号を細線で表わす。以下、純粋な信号を単に信号、不必要な信号をノイズと呼ぶ。細線で表わされているノイズは信号の低周期および高周期部分に分布しているため、応答スペクトル (Fig.7 (a)) には影斜線で表わされるように本来の信号によるスペクトルの形状 (この応答スペクトルを  $C_0$  とする) にノイズによる成分がスカート状に付加される ( $C$ )。固有周期 (横軸) が 0 の点に注目するとノイズ成分のために応答スペクトルの値、言い換えると入力振幅の最大値が高くなっていることに気付く。従って入力振幅の最大値を基準化する評価法 A では、模擬常時微動に対する応答スペクトルは必ず点  $P$  (図(a)参照) を通らねばならず、しかも曲線  $C$  にできるだけ近くなければならないため、大きい減衰定数  $h_3$  を有する応答スペクトル  $C_3$  が条件を満たす応答スペクトルとして選出されることになる。これらの問題に対処するには、1) 常時微動の波形に何らかの処理を施し必要な信号の部分だけを抽出する<sup>10)</sup>、2) ノイズのレベルを低減する、などの方法が考えられる。しかし方法 1) では信号とノイズを明確に分離しなければならず、これは容易ではない。一方、方法 2) では、次の良案が考えられる。すなわち地表面における常時微動の波形に対する基盤での入力波 (ホワイトノイズに近い波) の最大振幅を後述する方法で求め、地表面での常時微動の波形と、基盤での入力波に対する 1 自由度系の応答波とを基準化せず、両者の最大振幅が異なったまま応答スペクトルを比較する。この方法によれば模擬常時微動波に対する応答スペクトルの固有周期  $T=0$  における値が必ずしも  $C$  のそれに一致する必要はない (図 (c) 参照)。ところで減衰定数  $h$  の大きい模擬常時微動波に対する応答スペクトル ( $C_6$ ) では  $T=0$  近傍の傾きが小さい。他方  $h$  の小さい模擬常時微動波に対する応答スペクトル ( $C_4$ ) ではそれが大きい。従って評価法 A で求まる  $h$  よりも小さい  $h$  を有する模擬常時微動波に対する応答スペクトル ( $C_5$ ) が  $C$  に最も近くなり、さらには  $C_0$  にも近くなるので、 $C_5$  に対応する減衰定数  $h_5$  ( $< h_3$ ) が選出されるものと考えられる。

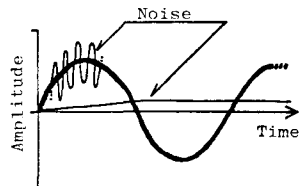
4-2 基盤面における常時微動の最大振幅値を既知とする評価法  
ここでは、4-1 の最後に述べた評価法 (評価法 B と呼ぶ) を用いて地盤の減衰定数を検討する。

基盤での常時微動の最大振幅値を推定するために、表層地盤が単一な層で構成されていると仮定し、地盤の 1 次のせん断振動のみに着目する。地表面と基盤面での絶対振幅値の関係が  $A_1 = 2A_2/\alpha$  であることが既に導き出されている。ここに  $A_1$ 、 $A_2$  はそれぞれ地表面と基盤面での振幅を、 $\alpha$  は表層地盤と基盤層とのインピーダンス比を表わす。インピーダンス比  $\alpha$  は表層地盤と基盤のせん断波速度および単位体積重量の関係 ( $\alpha = \rho_1 V_1 / \rho_0 V_0$ , 添字 0, 1 はそれぞれ基盤、表層地盤を表わす) で表わされる。従ってこの関係を  $A_1 = 2A_2/\alpha$  に代入すると次式を得る。

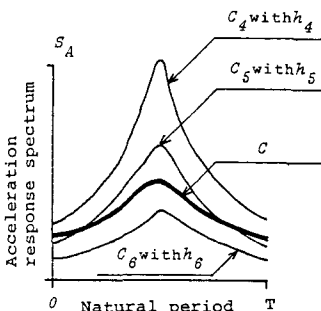
$$A_1 = 2A_2 (\rho_0 V_0 / \rho_1 V_1)$$



(a) Response spectrum in the method A



(b) Time history



(c) Response spectrum in the method B

Fig.7 Noise in microtremor

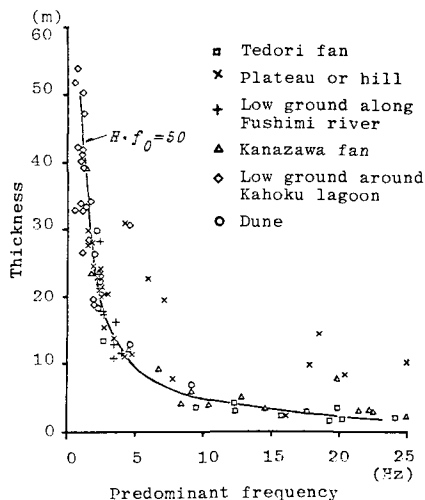


Fig.8 Relationship between  $H$  and  $f_0$

ところで、石川県の地盤で得られた表層地盤の厚さ $H$ と重複反射理論から求まる地盤の卓越振動数 $f_0$ との関係をFig.8に示す<sup>13)</sup>。同図より特に沖積層が表層を覆っている地盤に限って言えば、表層地盤の厚さと地盤の卓越振動数の関係は $H \cdot f_0 = 50$ であることが確認される。また $H \cdot f_0 = 50$ の関係と地盤の固有周期を推定する方法である言わゆる4分の1波長法とから、表層地盤のせん断波速度は200m/secであることがわかる。他方、ボーリングデータから推定した表層地盤の平均せん断波速度は209m/secであった。従って今回測定を行った地盤に限っては平均的なせん断波速度が200m/secと考えても問題がないと思われる。これらのことと、基盤の単位体積重量 $\rho_0$ を2.2t重/m<sup>3</sup>、せん断波速度 $V_0$ を $N$ 値50から推定して295 m/secとし、表層地盤の単位体積重量 $\rho_1$ に実際の地盤における平均的な値と考えられる1.7 t重/m<sup>3</sup>を用いると、結局、 $A_1/A_2 = 3.8$ となる。このことは表層地盤を単一な層と考え1次のせん断振動にのみ注目をするという大胆な仮定の下で、基盤の $N$ 値は50程度であることを考慮すれば、表層地盤の常時微動の最大振幅値の増幅率 $A_1/A_2$ は地盤の卓越振動数に関係なく3.8程度となることを表わしている。従って、基盤における常時微動の最大振幅値は地表面で得られたその1/3.8程度であると考えることで求められる。以上のように、基盤における最大振幅値を地表面のその1/3.8倍であることを考慮する以外は評価法Aと同様に解析を行った。Table 2に評価法Bを用いて地盤の減衰定数を評価した結果を示す。同表より評価法Bを用いた結果は評価法Aを用いた結果と比較して小さい値を示していることがわかる。また、Table 1とTable 2を比較してみると、評価法Bの結果はTable 1のそれに比較的よく一致している。すなわち評価法Bの結果は重複反射理論において地盤の内部減衰定数と逸散減衰定数を考え、それらを1自由度系の減衰定数に表した結果と良く合っていることがわかった。

## 5. まとめ

本研究では地表面における常時微動の波形から表層地盤の減衰定数を評価する方法を提案した。3-1で述べた減衰定数、すなわち重複反射理論において地盤の内部減衰定数と逸散減衰定数を考え、それらを1自由度系に近似した時の減衰定数が表層地盤の減衰定数の真値を表わしていると考え、評価法A、Bによる結果と比較し、評価法Bが優れていることを示した。評価法Bには $H \cdot f_0 = 50$ の地盤にしか適用出来ないという欠点があるものの、沖積層が基盤の上に数十メートル程度ある地盤なら1次振動の減衰定数をほぼ評価できることがわかった。地表面における常時微動に含まれる情報から表層地盤の減衰定数が求められたことは従来から用いられている共振法等に比べ、簡単、且つ安価なコストで減衰定数の評価が行えるという点で画期的であると思われる。

## 参考文献

- 1) 例えば、K.Kanai : Engineering Seismology, University of Tokyo Press, pp.163 ~197, 1983.
- 2) 日本道路協会 : 道路橋設計方書・同解説V 耐震設計編, p.90, 丸善, 1980.
- 3) 河村社一 : 各種地震での地表・地中地震動特性, 第5回地盤振動シンポジウム, pp.45 ~48, 1977.
- 4) 木下繁夫 : 表層地盤の減衰特性に関する考察, 土木学会論文報告集, 第330号, pp.15 ~25, 1983.
- 5) 太田外気晴 : 嶋悦三, 高橋克也, 石田寛 : 鉛直アレー地震観測による地震特性の研究その3 - 地震の減衰性調査 -, pp. 641 ~ 642, 日本建築学会学術講演会梗概集, 1983.
- 6) 例えば、M.Kitaura, T.Ikemoto, T.Hibino : Evaluation of Damping Ratio in Surface Ground by Using Response Spectrum of Microtremor, Memoirs of the Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.17, No.2, pp.35 ~41, 1984.
- 7) 建設省北陸地方建設局 : 石川地盤図, 1982.
- 8) 粕野義夫・小堀為雄・北浦勝ら : 石川県地盤図北陸経済調査研究報告, 第66号, 1982.
- 9) 2)と同じ, p. 89.
- 10) M.Kitaura, and T.Ikemoto : Evaluation of Dynamic properties of Surface Layers Using Microtremor, Memoirs of the Faculty of Technology, Kanazawa University, Vol.15, No.2, pp.13~20, 1982.
- 11) 土岐憲三 : 構造物の耐震解析, 第2章, 技報堂, 1981.
- 12) 小澤慎治 : デジタル信号処理, 第7章, 実教出版, 1980.
- 13) 宮西康之 : 非線形性を考慮した重複反射理論による地盤動特性の評価, 金沢大学卒業論文, 1982.