

(28) 常時微動を用いた表層地盤の減衰定数評価法の提案

金沢大学工学部 正会員 池本敏知, 同 北浦 勝
国土開発センター 吉村誠吾

1. まえがき

地盤の動的パラメタの推定に関する現況を概観してみると、地盤の固有周期に関しては比較的精度良く推定する方法が提案されており、例えば常時微動などから求まる固有周期は道路橋設計示方書等に用いられている¹⁾。これまで地盤の良否を固有周期のみで判定を行ってきたが、地盤の動特性も総合的に把握するためには、地盤の減衰定数も把握しておく必要がある。現在行われている減衰定数の評価の各手法にはボーリング試験、三軸せん断試験などの実験を伴うため、地盤の減衰定数を知るまでに大がかりな設備や多大な費用を要した。著者らはこれまでに測定が容易でかつ経済的な地表面で得られる常時微動を用い、表層地盤の減衰定数を推定する方法について検討を加えてきた²⁾。この方法においては基盤入力波をホワイトノイズであると仮定している。しかしながら地盤によっては基盤入力波をホワイトノイズと仮定できない場合も少なくないことから、本研究では、まず表層地盤の堆積厚さと固有振動数との関係から基盤入力波の推定を行い、次に推定された入力波を従来の減衰定数の評価法に組み込んだ新しい手法を提案する。

2. 測定地点と地盤特性

常時微動の測定地点はFig. 1に示される30地点である。これらの地点ではボーリング調査が既に行われている³⁾。常時微動から求まる各地点の卓越振動数をFig. 2に示す。Fig. 2より、測定に選ばれた地点は卓越振動数が $1.0 \sim 3.5 \text{ Hz}$ の範囲に含まれる比較的軟弱な地盤であることがわかる。図中の区分より、各地盤はIV種、III種あるいはII種地盤の比較的卓越振動数が低い区分に含まれることがわかる。測定・解析方法については文献4)に詳細に記述されているため、ここでは簡単に説明する。測定にはサーボ型加速度計を用い信号をアンプで増幅し、データレコーダに収録する。解析ではデータレコーダの記録をローパスフィルタで 20 Hz 以上の高振動数成分を除去したのち計算機に入力する。このとき $0.02 \text{ 秒} \times 1024 \text{ 個}$ の約 20 秒 間を解析時間としている。常時微動の測定には速度計が一般に用いられている。これはノイズ成分である振動数領域も速度計は比較的感知しにくいからである。しかし本研究では、1)構造物が変位、速度に比べて加速度の影響を一般に受けやすいこと、2)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、ここでは加速度を使用している。

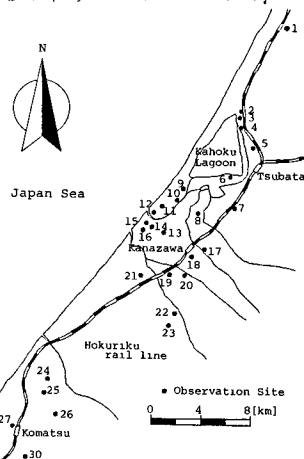


Fig.1 Observation sites of microtremor

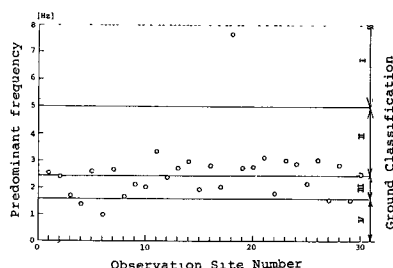


Fig.2 Predominant frequency at each site

3. 表層地盤の減衰特性

ここでは地盤を1自由度系であると考へ、減衰定数の値がどの程度に評価されるかを予備的に検討する。このとき内部減衰と遠散減衰が比較的精度良く取り扱われている重複反射理論を用い、得られる地盤の応答も常時微動の真の波形であると仮定する。Fig. 3に本方法の概略を示す。基盤面での常時微動波形をホワイトノイズであると考え、次に重複反射理論から求められる地表面での応答波と、表層地盤を1自由度系と仮定した場合の応答波を求める。このとき1自由度系の固有振動数には重複反射理論から求められる地盤の卓越振動数を用いた。またこのとき1自由度系

の減衰定数もパラメトリックに変化させる。従って減衰定数を変化させた数だけ1自由度系の応答波が求まることになる。この応答波のそれぞれを入力として加速度応答スペクトルを求め、重複反射理論から求めた応答波に対する加速度応答スペクトルとの差のR.M.S.値を計算する。この値が最も小さくなる時の1自由度系の減衰定数を表層地盤の減衰定数とする。重複反射理論においてはボーリングデータのN値からせん断波速度とN値の関係式¹⁾を用いて各層のせん断波速度を求めている。また重複反射理論には各層の内部減衰と最下層における逸散減衰が考慮されているため、ここで求められる減衰は内部減衰+逸散減衰を表わしていることがわかる。Table 1に得られた減衰定数の値を示す。表から評価された値は0.02~0.08程度であることがわかる。以下、この減衰定数の値を表層地盤の真値であるとみなす。

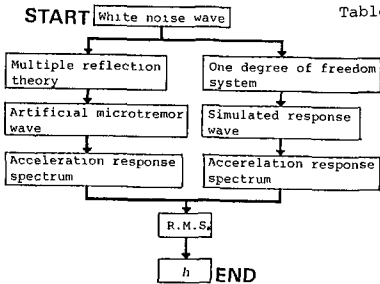


Table 1 Evaluated actual damping ratio at each site

No.	h	No.	h
1	0.03	16	0.04
2	0.04	17	0.07
3	0.05	18	0.08
4	0.02	19	0.03
5	0.03	20	0.02
6	0.04	21	0.06
7	0.02	22	0.05
8	0.03	23	0.06
9	0.02	24	0.08
10	0.07	25	0.05
11	0.07	26	0.04
12	0.05	27	0.06
13	0.02	28	0.03
14	0.04	29	0.04
15	0.03	30	0.05

Fig.3 Procedure of evaluating actual damping ratio

4. 基盤入力波の設定と表層地盤の減衰特性の評価

従来の著者が提案してきた地盤減衰定数の評価法では、基盤入力波をホワイトノイズであると仮定していた。基盤面での入力波を工学的に取扱い易いという立場からホワイトノイズに近い波形であると仮定する場合も少なくないが、実際にはかならずしもホワイトノイズであると仮定できない場合もある。このことは地表面の常時微動波形といわゆる工学的な基盤面のそれを同時に観測することによっても明らかである。そこで本研究では基盤入力波もホワイトノイズであると考えず、以下に述べる二つの方法から基盤入力波の推定を行うとともに、この基盤入力波を用いた減衰定数の評価法を提案する。

4-1 表層地盤を1層とする場合の基盤入力波の推定と減衰性の評価

データから得られた表層地盤の厚さH（地表面から、N値50をこえる地点までの深さ）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. 4に示す。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、Hと f_0 との間に相関性が認められる。このことは4-2で述べる内容から、ある程度説明がつくものと考えられる。常時微動の測定結果から地盤の固有振動数がわかれば、Hと f_0 の関係式からHがわかり、さらに $f_0 = C / (4H)$ なる慣用式から表層地盤のせん断波速度Cを求めることができる。表層地盤の単位体積重量 γ_1 には比較的軟弱な地盤における平均的な値である 1.7 tf/m^3 を用いた。一方基盤のせん断波速度、単位体積重量はそれぞれ 500 m/sec 、 2.2 tf/m^3 と仮定する。地盤パラメタが仮定あるいは推定されたので重複反射理論を用いて、地表面の常時微動波形から基盤面での入力波を推定できる。Fig. 5 (a)に推定された基盤面での入力波の一例を、地表面で観測された常時微動波形とともに示す（測定地点No.5）。同図(b)には、同地点のボーリング柱状図に重複反射理論を用いて求めた結果も同時に掲載している。表層を単一層とみなした場合の基盤面での波形、スペクトルの形状、最大加速度が、多層であるとした場合のそれとに比較的良く一致していることが確かめられた。このことから、ボーリングデータも必要としない方法、すなわち地盤を1層とみなす方法によって、基盤波の推定が可能となる場合もあることがわかった。

以上述べた方法で求まる基盤波を入力とし、Fig. 6に示される手順にしたがい表層地盤の減衰定数の評価を行う。結果をTable 2に表わす。表の*印が本評価法によって比較的妥当な減衰定数を表わしている

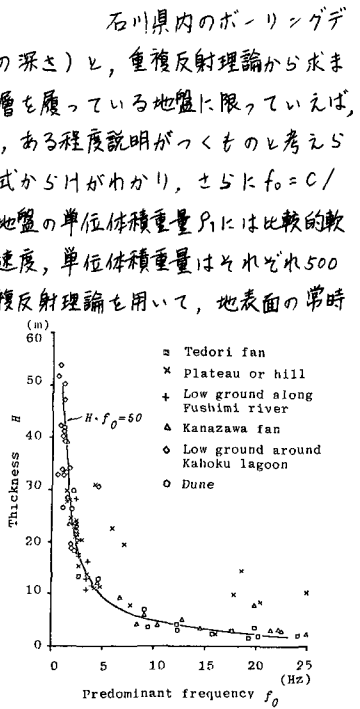


Fig.4 Relationship between Thickness and Predominant frequency of surface ground

ると考えられる地盤である。従ってこれらの地盤については表層地盤を一層と考える本評価法を用いて十分に評価できることが明らかになった。同時に、本評価法がある程度有効であることを確かめることができた。

4-2 表層地盤を二層とする場合の基礎入力波の推定と減衰性の評価

4-1で提案した評価法ではいくつかの地盤においては地盤の減衰性の評価が十分に行われていない。その理由のひとつとして表層地盤を単一層とみなし、基礎入力波を推定したことがあるものと思われる。そこでここでは表層地盤が二層で構成されているとして基礎入力波の推定に努めることにより、先に述べた問題点の改善を行った。このとき4-1で述べたHfoの関係をそのまま用いる。まずFig. 7に示される二層地盤を考える。地盤の諸定数は図中に表わされるごとくとする。波動インピーダンス比 α をパラメータに表層地盤の1層の固有周期 T_1 と2層の固有周期 T_2 との関係がDobryによって与えられている⁷⁾(Fig. 7(a),(b))。著者らはFig. 7(a),(b)から、1次固有周期と2次固有周期の比と2層の固有周期と1層の固有周期の比との関係、すなわち T_2/T_1 と T_2/T_1 との関係に書き改めた(Fig. 7(a))。この3つの図を用いて、地盤パラメータ $H_1, H_2, C_1,$

- ρ_1 : Density of 1st layer
- ρ_2 : Density of 2nd layer
- H_1 : Thickness of 1st layer
- H_2 : Thickness of 2nd layer
- C_1 : Shear wave velocity of 1st layer
- C_2 : Shear wave velocity of 2nd layer

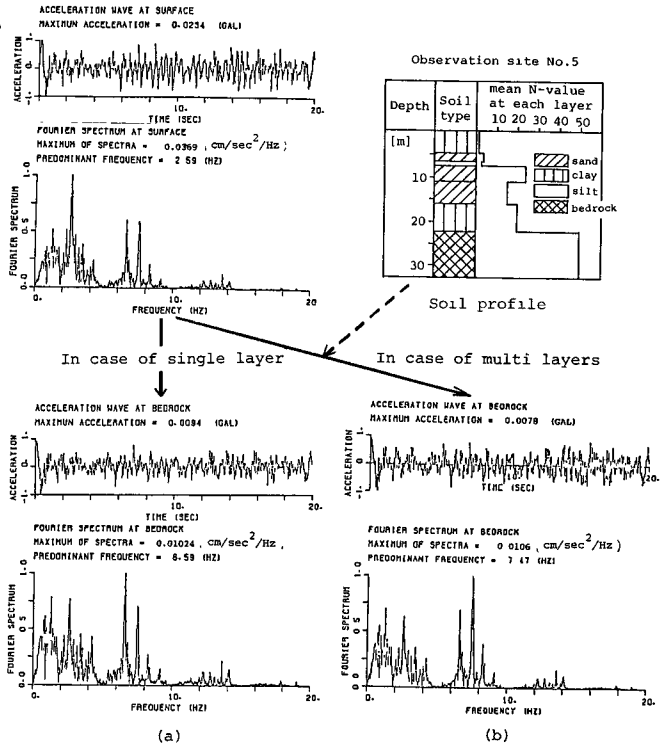


Fig.5 An example of results

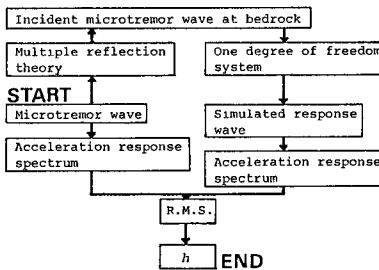


Fig.6 Procedure of evaluating damping ratio by new method

Table 2 Calculated damping ratio at each site

No.	h	h_1	No.	h	h_1
1	0.03	0.09	16	0.04	0.04*
2	0.04	0.03*	17	0.07	0.03
3	0.05	0.02	18	0.08	0.06*
4	0.02	0.03*	19	0.03	0.06
5	0.03	0.06	20	0.02	0.05
6	0.04	0.03*	21	0.06	0.06*
7	0.02	0.05	22	0.05	0.03*
8	0.03	0.05*	23	0.06	0.04*
9	0.02	0.06	24	0.08	0.05
10	0.07	0.05*	25	0.05	0.06*
11	0.07	0.07*	26	0.04	0.04*
12	0.05	0.09	27	0.06	0.01
13	0.02	0.07	28	0.03	0.05*
14	0.04	0.06*	29	0.04	0.01
15	0.03	0.04*	30	0.05	0.05*

h : Actual damping ratio
 h_1 : Damping ratio by the method described in 4-1

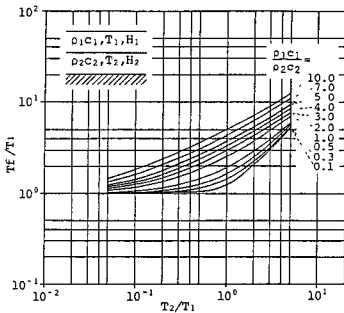


Fig.7(a) Relationship between T_f/T_1 and T_2/T_1 for first natural period

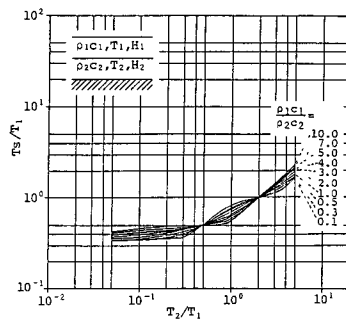


Fig.7(b) Relationship between T_s/T_1 and T_2/T_1 for second natural period

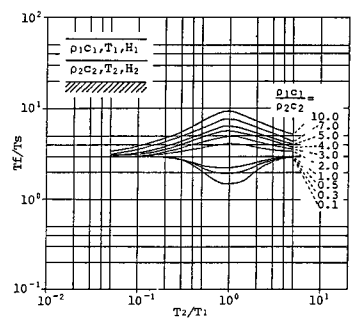


Fig.7(c) Relationship between T_f/T_s and T_2/T_1

C_2 を地表面で得られる常時微動の T_f , および T_s から推定する。以下その手順を示す。

- 1) 常時微動から T_f , T_s を求め T_f/T_s を得る (Fig. 7(c))。
- 2) T_f/T_s に対する T_2/T_1 を各々ごとに求める。
- 3) 各 T_2/T_1 から T_f/T_1 をFig. 7(a), (b)をもとに求める。従って T_f と T_s が常時微動のスペクトルから既にわかっているため、 T_1 と T_2 が求まることになる。
- 4) T_1 と T_2 を含む関係式 $T_1 = 4H_1/C_1$, $T_2 = 4H_2/C_2$, $(H_1 + H_2) \cdot f = 50$, $(C_1 H_1 + C_2 H_2)/(H_1 + H_2) = C_m$, を得る。ただし、 C_m は平均せん断波速度である。
- 5) ρ_1 , ρ_2 を実際の地盤の平均的な値 $1.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定し、上式から C_1 , C_2 , H_1 , H_2 を求める。この値を用いて、 α が計算できる (α^*)。
- 6) 各々に対して求まった α が α に最も近いときの C_1 , C_2 , H_1 , H_2 を、2層地盤のそれぞれの地盤パラメータで

基盤の ρ_3 , C_3 はそれぞれ $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 500 m/sec と仮定した。手順4)では表層地盤の平均せん断波速度が一定であるという仮定をもうけていることになる。この仮定は普遍性にかけるものである。しかしこの仮定については、Fig. 8に示されるような簡単な沖積層の堆積過程を考えることによって妥当性の検討を行うことができる。すなわち同じせん断波速度を有する2層地盤のA地点とB地点の堆積厚とをそれぞれ H_{2A} , H_{2B} とし、同様に第1層のそれぞれを H_{1A} , H_{1B} であるとする。A, B両地点の平均せん断波速度を求めてみると、 $H_{1A}/H_{1B} = H_{2A}/H_{2B}$ であるから、図中に表わされるようにほぼ等しくなる。このような堆積過程が実際に存在するとは限さないが、近似的な堆積過程としてはある程度妥当な考え方といえよう。従ってこの時点ですべての土質パラメータが既知となったので、4-1と同様に基盤入力波を求めることができる。

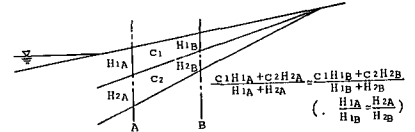


Table 3 Results of damping ratio by the method described in 4-2

No.	h	h_2
1	0.03	0.14
3	0.05	0.01
5	0.03	0.04*
7	0.02	0.02*
9	0.02	0.03*
12	0.05	0.12
13	0.02	0.10
17	0.07	0.01
19	0.03	0.02*
20	0.02	0.04*
24	0.08	0.08*
27	0.06	0.01
29	0.04	0.01

h_2 : Damping ratio by the method described in 4-2

以上のようにして求めた基盤入力波を4-1と同様にして評価法に組み込むことにより表層地盤の減衰性の評価を行った。その結果をTable 3に示す。表には、4-1において求めた減衰定数が3.で求めた値と一致しなかった13地点についてのみ示してある。同表の*印は本評価法によってある程度減衰定数を評価できた地盤を表わしている。2次の固有周期を考慮することによって、1次の固有周期のみでは評価できなかった地盤の減衰定数も評価できたことは興味深い。なお減衰定数が一致していない地点については現在検討中であり、詳細は発表時に譲る。

5. まとめ

本研究では地表面における常時微動の波形を用いる表層地盤の減衰定数の評価法を提案した。本方法は従来から提案している方法と比較して、基盤での波形をホワイトノイズと仮定しない場合に適用できることが特徴である。さらに基盤入力波の推定を、表層地盤を1層あるいは2層とした2つの場合について論じている。実際の地盤に適用した結果、ある程度妥当な地盤の減衰特性が得られたこと、2次以上の高次周期までも考えてゆく上での見通しを示唆したこと、は興味深いものと考えられる。

最後に本研究を実施するにあたり実験、解析などに協力いただいた本学大学院生・日比野友亮君、および図面作成などに助力していただいた北島 孝君に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 道路橋設計示書 同解説V 耐震設計編, 丸善, 1980.
- 2) 北村 勝 他: 常時微動の応答スペクトルを利用した地盤表面層の減衰定数評価法, pp.111~114, 第17回地震工学研究発表会, 1983.
- 3) 建設省北陸地示建設局: 石川地盤図, 1982.
- 4) Kikaura, M. 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.
- 5) Dobry, R., I. Owses and A. Ursua: Simplified Procedures for Estimating the Fundamental Period of a Soil Profile, B.S.S.A., Vol. 66, No. 4, pp. 1493~1521, 1976.