

# 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

大町達夫\*・紺野克昭\*\*・遠藤達哉\*\*\*・  
年縄 巧\*\*\*\*

常時微動にレイリー波が多く含まれていることを前提に、微動の水平動と上下動の振幅比を用いて地盤の卓越周期を推定する上で障害となっていた幾つかの問題点を理論的に解明するとともに、常時微動と表面波との関連性を明らかにした。それに基づいて多層地盤の卓越周期の簡便な推定手順を具体的に提案した。最後に、東京都区内の全中学校を測定点とする常時微動を実測した結果を用いて東京都区部の周期マッピングを行い、既往のマップと比較して提案の実用性を実証した。

**Key Words** : microtremor, Rayleigh wave, predominant period, amplitude ratio

## 1. はじめに

原位置地盤調査として、常時微動測定は既に多方面で実施されている。通常この測定の眼目は、地盤の卓越周期と増幅倍率の推定におかれるが、前者のみの場合も少なくない<sup>1)</sup>。増幅倍率を推定する前段で卓越周期が精度よく推定されている必要があることや、周期に比較すると倍率の推定は不明の点が多く残されていることなどがその理由と考えられる。しかし常時微動が、しばしば時間的に安定しないことや地盤特性よりも発振源特性を反映する傾向が強いことなどから、卓越周期の推定さえ困難であるとの指摘もある<sup>2)</sup>。

常時微動による地盤調査の信頼性を高めるため、中村らは微動の水平動振幅スペクトルと上下動振幅スペクトルの比（以下、振幅比スペクトルと呼ぶ）を用いる方法を提案している<sup>3)</sup>。本方法の骨子は、微動の振幅比スペクトルにおいて最大ピークを与える周期を地盤の卓越周期、その周期における振幅比の値を増幅倍率とみなすものである。この方法の利点として、卓越周期と増幅倍率の両方が簡単に推定できること、交通機関や工場機械などの人工振動源による悪影響を排除して地盤自体の振動特性が抽出しやすいことなどが挙げられている。著者らもこの方法を使って各地で調査を行ってきた<sup>4)</sup>が、そのたびに本手法の簡便性と有用性は賞賛に値するものの、実用性を高めるためには理論的根拠を明確にし推定手法を洗練化する必要があるとの印象を強めた。

本手法の理論的根拠について、中村は鉛直入射する実体波（S波とP波）の増幅特性の観点から説明を試み

ている<sup>5)</sup>。この説明は、常時微動には重複反射するS波が支配的であるという金井・田中<sup>6)</sup>以来の考えに沿ったものと言える。一方、振動源が地表付近に存在し、実体波に比べて表面波の方が幾何減衰が小さいことや、常時微動が表面波特有の分散性を示すことなど、微動には表面波（レイリー波とラブ波）が支配的であるとの指摘もあり、この観点から本手法の有効性を検証しようとする気運もある<sup>7), 8)</sup>。本論文における著者らの意図は、この気運に従って本手法を表面波の観点から理論的に補強し地盤調査手法としての完成度を高めようとする点にある。

近年、周期数秒以上の微動についても研究が進んでいるが、本論文では常時微動として従来対象とされてきた0.1～数秒の周期範囲に限定し、これには表面波が多く含まれていることを前提とする。この前提から、常時微動は比較的浅い地盤構造を反映し、その上下成分はレイリー波の、水平成分はレイリー波とラブ波の特性に起因する性状を示すことが期待される。以下では、このような考えをもとに、常時微動から地盤の卓越周期を精度よく推定する方法について検討する。

## 2. 2層地盤のレイリー波振幅比と卓越周期

レイリー波の水平動と上下動の振幅比は地下構造によって定まる。大半の実地盤は多層構造をしているが、層数が増すにつれレイリー波振幅比は複雑に変動し一般の特徴が把握しにくい。そこで、最も単純な水平2層弾性地盤モデルを用いて、レイリー波振幅比の特徴を調べる。

### (1) 解析モデル

対象とする地盤は、S波速度が500 m/sの基盤と、それより小さなS波速度をもつ表層とで構成され、密度は基盤と表層で同一とする。表層のS波速度  $V_{s1}$  は基盤に対するインピーダンス比  $\alpha (= V_{s1}/V_{s2})$  が  $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$

\* 正会員 工博 東京工業大学総合理工学研究所 教授  
(〒227 横浜市緑区長津田 4259)

\*\* 学生員 工修 東京工業大学総合理工学研究所 博士課程

\*\*\* 正会員 工修 北海道開発庁  
(当時 東京工業大学大学院修士課程)

\*\*\*\* 正会員 工博 東京工業大学総合理工学研究所 助手

表-1 2層地盤モデルの物性値

Case	S-wave Velocity of Surface Layer $V_{s1}$ (m/s)	Poisson's Ratio of Surface Layer $\nu_1$	Impedance Ratio ( $=V_{s1}/500$ ) $\alpha$
1	50	0.4950	0.10
2	75	0.4925	0.15
3	100	0.4900	0.20
4	125	0.4875	0.25
5	150	0.4850	0.30
6	175	0.4825	0.35
7	200	0.4800	0.40
8	225	0.4775	0.45
9	250	0.4750	0.50
10	275	0.4725	0.55
11	300	0.4700	0.60
12	400	0.4600	0.80

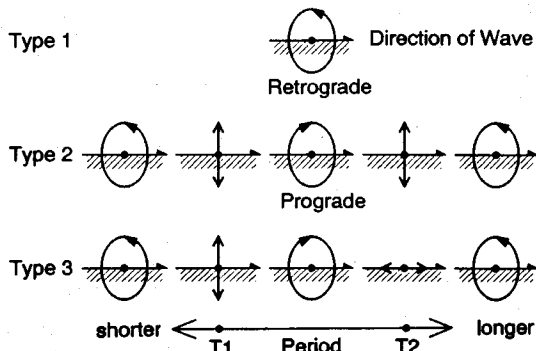


図-1 レイリー波の基本モードの粒子軌跡から見た地盤分類

で12段階となるように、表層と基盤のポアソン比は飽和地盤での対応を考え<sup>9)</sup>、表-1のように定める。また表層厚  $H$  を、対象地盤に鉛直入射するS波の卓越周期が1秒となるように、次式で与える。

$$H = V_{s1}/4 \dots \dots \dots (1)$$

(2) レイリー波の振幅比スペクトル

地表におけるレイリー波の振幅比は、周期によって著しく変動する。そして、その変動状況は、レイリー波の粒子軌跡の形状を考えると明かになる。また、表層厚さが式(1)の2層地盤では高次モードの遮断周期が1秒以下のためS波の卓越周期付近に高次モードは存在しないから、ここでは基本モードだけを考える。

レイリー波基本モードの粒子軌跡<sup>10)</sup>は、長周期側と短周期側の極限では地盤構造によらず逆転の楕円形を描く。そしてそれらの中間領域では、図-1に示す3つの状況のうちの一つとなるが、その支配要因は表層と基盤のインピーダンス比  $\alpha$  である。すなわち、 $\alpha$  が大きい場合、粒子軌跡は周期によって形状変化を示すものの全周期範囲にわたって逆転する楕円のままである(タイプ1)。ある程度  $\alpha$  が小さい場合、周期が短周期から長周期へ変動すると、ある周期(=  $T_1$ )で水平動振幅が0となって楕円軌跡は逆転から順転に移行する。さらに周期

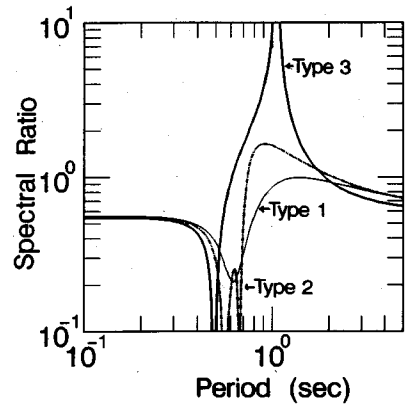


図-2 各地盤タイプのレイリー波の振幅比スペクトル

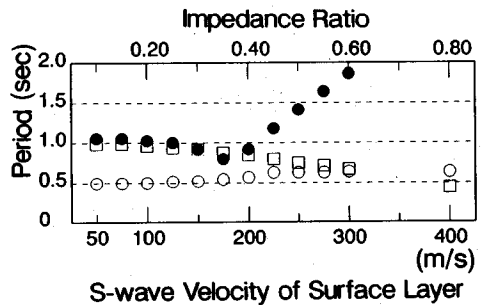


図-3 各地盤モデルにおけるレイリー波の谷周期 (○) とピーク周期 (●)、ラブ波のエアリー相の周期 (□)

が長くなると、楕円軌跡は順転から逆転へと移行するが、この周期(=  $T_2$ )では水平動振幅が0になる場合(タイプ2)と上下動振幅が0になる場合(タイプ3)とがある。表-1に示す12通りのインピーダンス比  $\alpha$  に対して粒子軌跡は、 $0.45 \leq \alpha$  のときタイプ1、 $\alpha = 0.4$  のときタイプ2、 $\alpha \leq 0.35$  のときタイプ3となる。実用上は厳密さを多少犠牲にして、 $\alpha^{-1} < 2$  ではタイプ1、 $2 < \alpha^{-1} < 3$  ではタイプ2、 $3 < \alpha^{-1}$  ではタイプ3と大別すれば、記憶しやすい。

このような粒子軌跡の周期特性に対応して振幅比の周期変化、すなわち振幅比スペクトルも3種類に大別できる。3つのタイプの典型的な振幅比スペクトルを両対数グラフで示すと図-2のようになり、タイプ1はV字型、タイプ2はW字型、タイプ3は逆N字型と呼ぶことができる。タイプ2では2つの周期  $T_1$  と  $T_2$  で水平動振幅が0となるため、これら2つの周期で深い谷を形成しW字形を示す。タイプ3では、 $T_1$  で水平動振幅が0となるため深い谷となるが、 $T_2$  で上下動振幅が0となるので鋭いピークとなり逆N字形を示す。そして、タイプ1では両振幅とも0となる周期がないので谷もピークも比較的なだらかなV字形を示す。

(3) S波の卓越周期と表面波の周期

図-3は、レイリー波の振幅比スペクトルに見られる

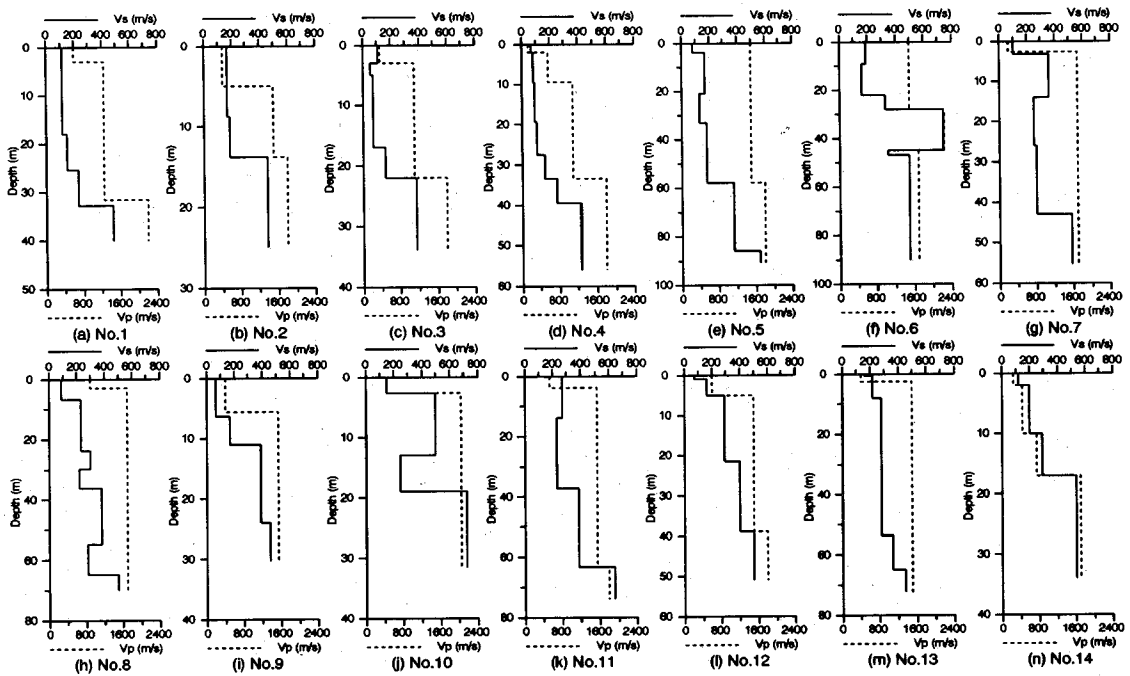


図-4 PS 検層地点の速度構造

ピークと谷の周期をそれぞれ●と○で示している。タイプ2では、レイリー波の振幅比スペクトルに2つの谷周期が存在するが、この場合は微動の振幅比スペクトルとの対応を考え、平滑化した後の振幅比スペクトルが最小となる方の周期を谷周期として用いた。また、図-3には、ラブ波基本モードの群速度が最小の(エアリー相)の周期を□で示してある。なお、ラブ波の振幅はエアリー相の周期付近で最大となることが知られている。また、前述のようにS波の卓越周期は1秒である。図-3の横軸には、表層のS波速度  $V_{s1}$  とインピーダンス比  $\alpha$  を示している。この図から次の点が指摘できる。

a)  $\alpha < 0.25$  では、S波の卓越周期、レイリー波の振幅比スペクトルのピーク周期およびラブ波のエアリー相の周期は一致する。

b)  $0.25 \leq \alpha$  では、振幅比スペクトルのピーク周期は、 $\alpha = 0.35$  付近で最小となり、 $\alpha$  の増加とともに長くなる。

c) また、ラブ波エアリー相の周期は  $0.25 \leq \alpha$  では、 $\alpha$  の増加とともに単調に短くなる。

d) 振幅比スペクトルの谷周期は、 $\alpha < 0.3$  でS波卓越周期の1/2であるが、 $0.3 \leq \alpha$  ではそれよりやや長い。

e) 振幅比スペクトルの谷とピークを与える周期の比は、最大値が0.6程度で、 $\alpha \leq 0.25$  では0.5である。

f) レイリー波振幅比の谷周期とラブ波エアリー相の周期の比は、 $0.25 < \alpha$  では  $\alpha$  の増加につれて0.5から単調に増大し、 $\alpha = 0.8$  では1を越える。

### 3. 多層地盤の振幅比スペクトルとS波卓越周期の関係

ここでは、PS 検層と常時微動実測の結果をもとに、実在する多層地盤を対象として振幅比スペクトルとS波卓越周期との関係を明かにし、常時微動測定によって地盤の卓越周期を推定する手順を考察する。

#### (1) PS 検層地点における常時微動の測定・解析処理

PS 検層が既に実施されている京浜地域の合計14地点で常時微動を測定した。測定には、固有周期約1秒の3成分速度センサー(東京測振・SPC-35E)を用いた。サンプリング周波数50Hz、サンプル数  $3 \times 2048$  個を1回の測定とし、同一地点で合計4回の測定を行った。

実測後、常時微動の時刻歴データを次の手順で解析処理した。まず、FFTで3成分のフーリエスペクトルを求めた。これによって、水平2成分は各離散周期ごとの楕円運動として表現されるので、これから、その長軸の長さの半分をとって水平動の振幅スペクトルとした。次に、水平動スペクトルと上下動スペクトルを別々にバンド幅0.49HzのParzenウィンドウで平滑化して、水平動と上下動の振幅比スペクトルを求めた。このようにして4回分の振幅比スペクトルを求め、それらを相乗平均することによって、各地点における常時微動の振幅比スペクトルとした。水平2成分を合成しないで、別々に処理しても通常は、ほとんど同一の卓越周期が抽出できる

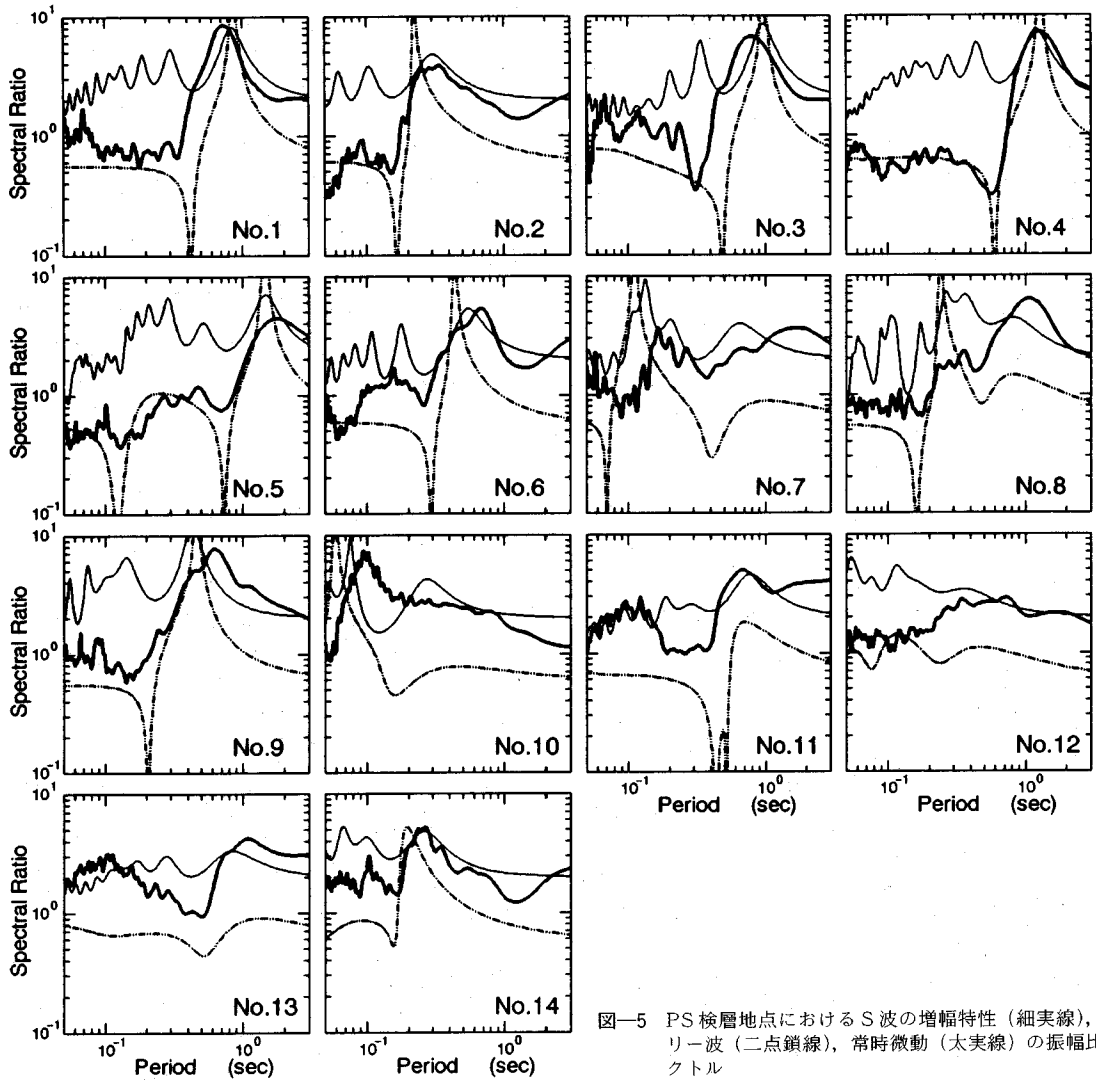


図-5 PS 検層地点における S 波の増幅特性 (細実線), レイリー波 (二点鎖線), 常時微動 (太実線) の振幅比スペクトル

が, まれに両者が異なる場合がある. そのような場合, 両者の差異が特別な意味を持つこともあるが, ここでは判断の容易さを優先させて上記の振幅比スペクトルを採用した.

(2) 多層地盤モデルにおけるレイリー波の振幅比

14 地点の PS 検層から得られた速度構造を図-4 に示す. ここでは, PS 検層の最下層を半無限の基盤として扱う.

a) 振幅比スペクトル

図-5 に, 各地点におけるレイリー波の振幅比スペクトル, S 波の増幅特性および常時微動の振幅比スペクトルを示す. なお, S 波の増幅特性は媒質によらず  $Q$  値を 20 として算定しているが,  $Q$  値が多少変動しても本研究の対象である地盤の周期は変動しないと考えられる.

図-5 の二点鎖線で示されたレイリー波の振幅比スペクトルには, 2 層地盤で明かになったスペクトル形状の 3 つの形式が単独で, または複合して見られる. これらの多層地盤を, 2 層地盤で述べたようにレイリー波の粒子軌跡の周期特性をもとに 3 分類すると, No. 1 ~ No. 10 はタイプ 3, No. 11 と No. 12 はタイプ 2, No. 13 と No. 14 はタイプ 1 である. なお図-5 では分かりにくい, No. 5 ではレイリー波の水平動振幅が 0 となる  $T_1$  は 0.7 秒であり, No. 12 では W 字形の谷を与える周期  $T_1$  と  $T_2$  はともに 0.05 秒以下にある.

b) ピーク周期と S 波の卓越周期

図-5 の細実線で示された S 波の増幅特性や二点鎖線で示されたレイリー波の振幅比スペクトルには複数のピークがあるが, 各曲線で最大ピークを与える周期をそれぞれ S 波の卓越周期および振幅比スペクトルのピー

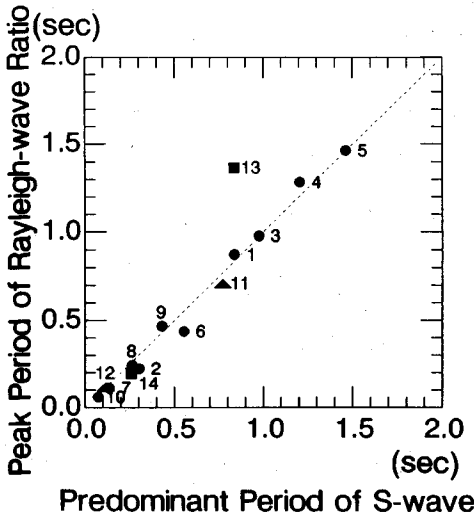


図-6 レイリー波の振幅比スペクトルのピーク周期とS波の卓越周期の関係

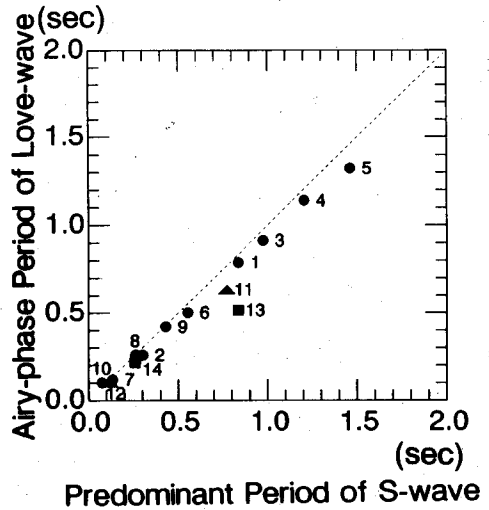


図-7 ラブ波のエアリー相の周期とS波の卓越周期の関係

ク周期として選定し両者を比較したのが図-6である。図中の番号1~14は地点番号であり、■、▲、●の記号はそれぞれ前述のタイプ1~3を示している。本図によれば、S波の卓越周期とレイリー波振幅比のピーク周期は、タイプ2と3ではほとんど一致するが、タイプ1では後者のほうが多少長いという図-3で指摘したのと類似の特性があることが分かる。

図-7は、S波の卓越周期とラブ波エアリー相の周期を比較したものである。図中の3種類の記号は図-6と同様に、3つのタイプを示している。本図においても図-3で指摘したのと同様に、タイプ2とタイプ3ではS波の卓越周期とラブ波エアリー相の周期はほとんど一致するが、タイプ1では後者の方がやや短くなる傾向が認められる。

図-8は、常時微動の振幅比スペクトルにおけるピーク周期とS波の卓越周期を比較したものである。前掲の図-6や図-7ほどではないが、常時微動のピーク周期もS波の理論卓越周期とかなり良い対応を示している。ただし中には、No. 8やNo. 12地点のピーク周期のように理論卓越周期の2倍以上長く、良い対応を示さない実測結果もある。そこで、これら2地点における微動の振幅比スペクトルを図-5で再検討してみれば、次のような指摘ができる。

No. 8地点の微動とレイリー波の振幅比スペクトルの形状は比較的よく似ている。ただし、レイリー波のピーク周期はS波増幅曲線における3次モードの周期と対応し、微動のピーク周期1.0秒はその基本モードの周期0.8秒と対応するように見えるが明かにこれより長い。この地点のPS検層結果は図-4(h)に示すように最大深度は70mで、最下層でS波速度500m/sが検出され

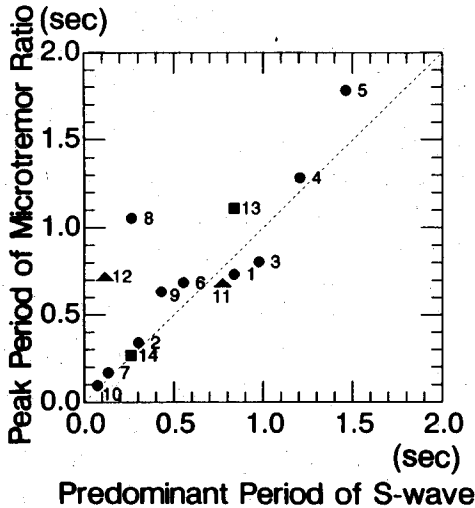
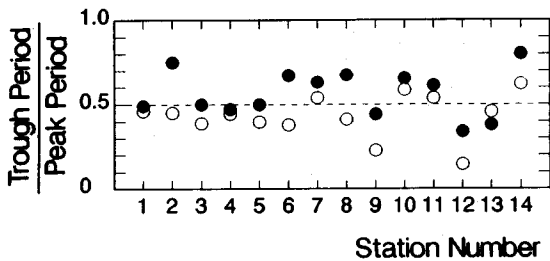


図-8 常時微動の振幅比スペクトルのピーク周期とS波の卓越周期の関係

ているが、地表から深さ70mの間でS波速度は、かなり複雑に変動している。これらのことから、実測結果は70mより深い部分を基盤とする卓越周期を検出した可能性がある。

No. 12地点における微動の振幅比スペクトルは、図示の周期範囲では14地点中最も平坦で起伏の少ない形状をしている。図-4(1)に示すこの地点のPS検層結果によれば、S波速度は深度とともに単調に増加する。この地盤構造から算定されるS波の卓越周期もレイリー波のピーク周期も0.1秒以下の短周期で、これらには厚さ1mの最表層の寄与が最大と考えられるが、詳細な資料が不足しているためこれ以上の検討は行えない。いずれにしても振幅比スペクトルがこのように平坦



図—9 PS 検層地点におけるレイリー波 (●) および常時微動 (○) のピーク周期に対する谷周期

な場合には、本研究で扱う微動測定で良好な結果を得るのは困難と言えよう。

### c) ピーク周期と谷周期

微動の振幅比スペクトルの谷は従来あまり注目されていないが、振幅比スペクトルにおける谷は、ピークとともに重要な情報源である。レイリー波と微動の振幅比スペクトルからピークと谷の周期を読み取り、前者に対する後者の比をプロットした結果が図—9である。同図では、微動の実測周期比を○印で、レイリー波の理論周期比を●印で、地点ごとに示している。理論周期比は、2層地盤では0.6以下の値をとることを図—3で見たが、多層地盤では0.8程度にもなっている。一方、微動の実測周期比は理論周期比より小さめで0.6~0.2の範囲にあり平均的には0.5程度となっている。

微動の実測周期比とレイリー波の理論周期比とが必ずしも一致しない原因はいくつか考えられる。たとえば、理論計算では地盤を水平多層と仮定しているが実地盤は不整形であること、微動にPS検層より深い地下構造の影響も含まれていること、実測微動にはレイリー波だけでなくラブ波や実体波が混入している可能性が高いことなどである。これらの原因を除去すれば、微動測定による地盤卓越周期の推定精度の向上に有益と思われる。しかし、本研究ではそれを行う代わりに、ここで見いだされた事実や知見を最大限利用して、地盤の卓越周期を常時微動の振幅比スペクトルから判読する方法を次に提案する。

### (3) 多層地盤の卓越周期の判読方法

以上をもとに、既述の方法で常時微動の測定・解析処理を行って得られた振幅比スペクトルから地盤のS波卓越周期を判読する方法をまとめれば、次のようになる。なお、( ) 内の数字は、該当する測点番号である。

a) 常時微動の振幅比スペクトルが逆N字形で明瞭なピークがあり、このピーク周期の約半分のところに明瞭な谷が見られるとき (No.1~6, No.9~10), このピーク周期は、高い確度で卓越周期と見なせる。

b) 振幅比スペクトルに明瞭なピークが2つ以上ある場合 (No.7, 11, 14), 最大のピークを与える周期が卓越周期である確度がかなり高い。最大の振幅比に対応す

るピーク周期を採用することによって、振幅比スペクトルがW字形の場合の中間ピークを採用するかどうかの迷いは避けられる。なお、ピークの周期幅が狭く孤立している場合には、地盤特性以外の特定振動源が影響している可能性が強いので、このようなピークは対象から除外する。

c) 明瞭なピークが見られない場合 (No.12, 13), 基本的には最大ピークを与える周期を卓越周期の候補とする。ただし、明瞭なピークは見られないが明瞭な谷が見られる場合 (No.13), この谷周期の2倍程度の周期にピークがあれば、そのピーク周期が卓越周期である確度が高い。この場合の振幅比スペクトルは√字形をしており、逆N字形やW字形よりもV字形に近い。

d) ある測点周辺での卓越周期が判明している場合にはそれらも参照し上記 a)~c) をもとに、最も妥当と思われる周期を卓越周期と見なす。

## 4. 地盤の卓越周期判読方法の適用例

### (1) 東京都区内の全中学校を対象とした常時微動測定

東京都23区内には、国公立、私立を含め全部で546校の中学校がある。東京都区部の面積は約598 km<sup>2</sup>なので、各中学校を1測点として常時微動測定を行えば、約1 km<sup>2</sup>ごとに1つの地盤卓越周期が得られることになる。したがって、全中学校が立地する地盤の卓越周期を把握すれば、分解能が約1 km<sup>2</sup>の東京都区部の周期マップが自ずと作成できることになる。また、学校は災害弱者としての児童生徒を日常的に多数かかえており、地域の避難場所に指定されていることが多いことなどを考えれば、学校を測点とする都市のサイスミックゾーニングには、地震防災上、特別重要な付加価値を見いだすこともできる。このような着想から、東京都区内の全中学校を対象とする常時微動測定を実施した。

測定は、1990年12月から1992年12月までの間に、通算32日間で行った。測定点は学校の正門付近を原則としたが、作業場所の確保が困難であったり交通振動が特に大きい場合には、校庭あるいは裏門付近を測定点とした。測定計器として、全546地点中の521地点では(財)鉄道総合技術研究所が開発したPIC 86を、残りの25地点では(株)東京測振のSPC-35 Eを使用した。両計器の仕様が異なるため、サンプリング周波数を前者では60 Hz、後者では50 Hzとしたが、サンプル数は両者とも一回について2048個とし、同一地点で3回の測定を行った。各地点で実測した常時微動データの解析処理手順は、3.(1)で述べた通りである。

なお、PIC 86とSPC-35 Eの計器特性の相違を調べるため、同一地点で同時に常時微動を測定し上記の手順で振幅比スペクトルを求めてみた。その結果、周期0.6

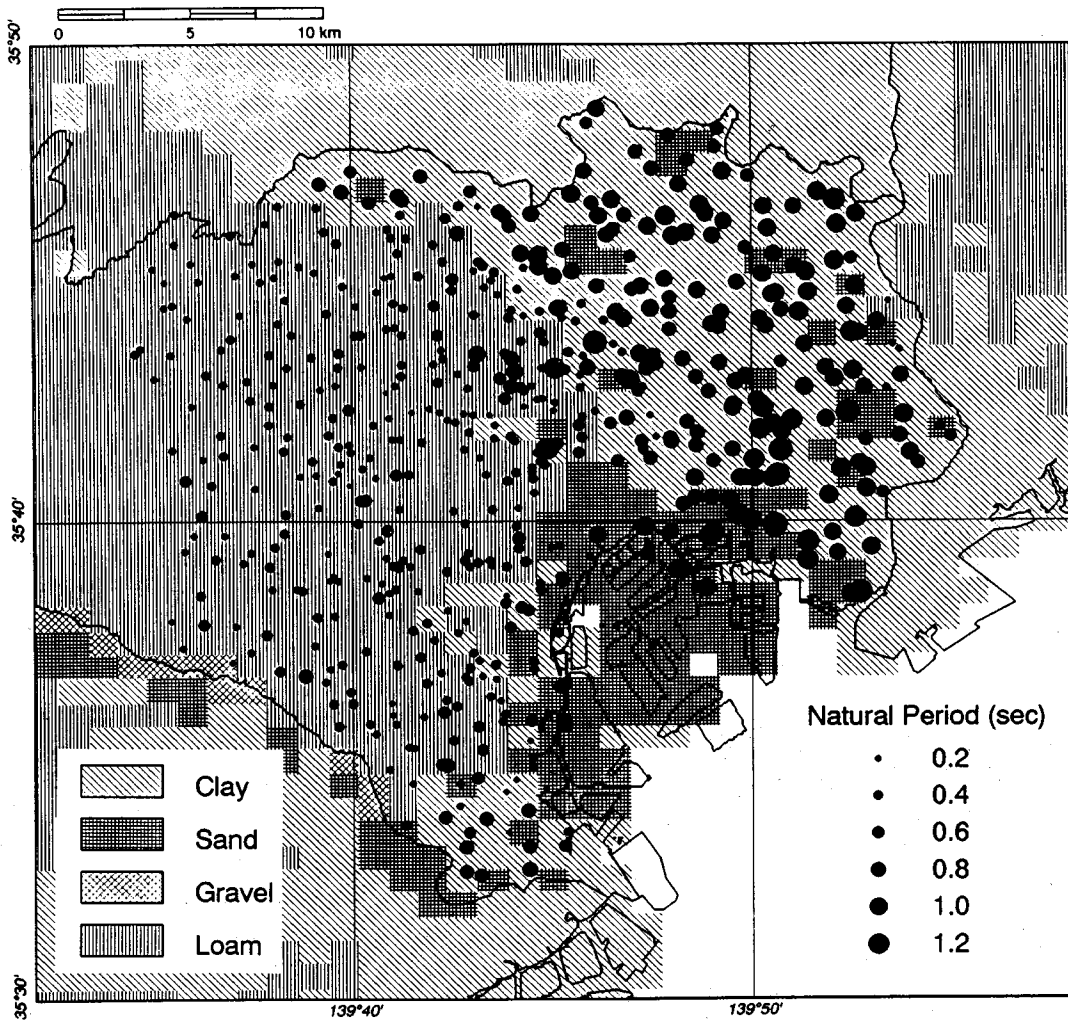


図-10 東京都区部の常時微動から推定した地盤の卓越周期の分布と国土数値情報<sup>11)</sup>から得られた表層地質

秒以上の長周期側の振幅比スペクトルにわずかな相違が見られたが、卓越周期の推定には影響ないと判断し、本論文では両計器間の補正は行っていない。

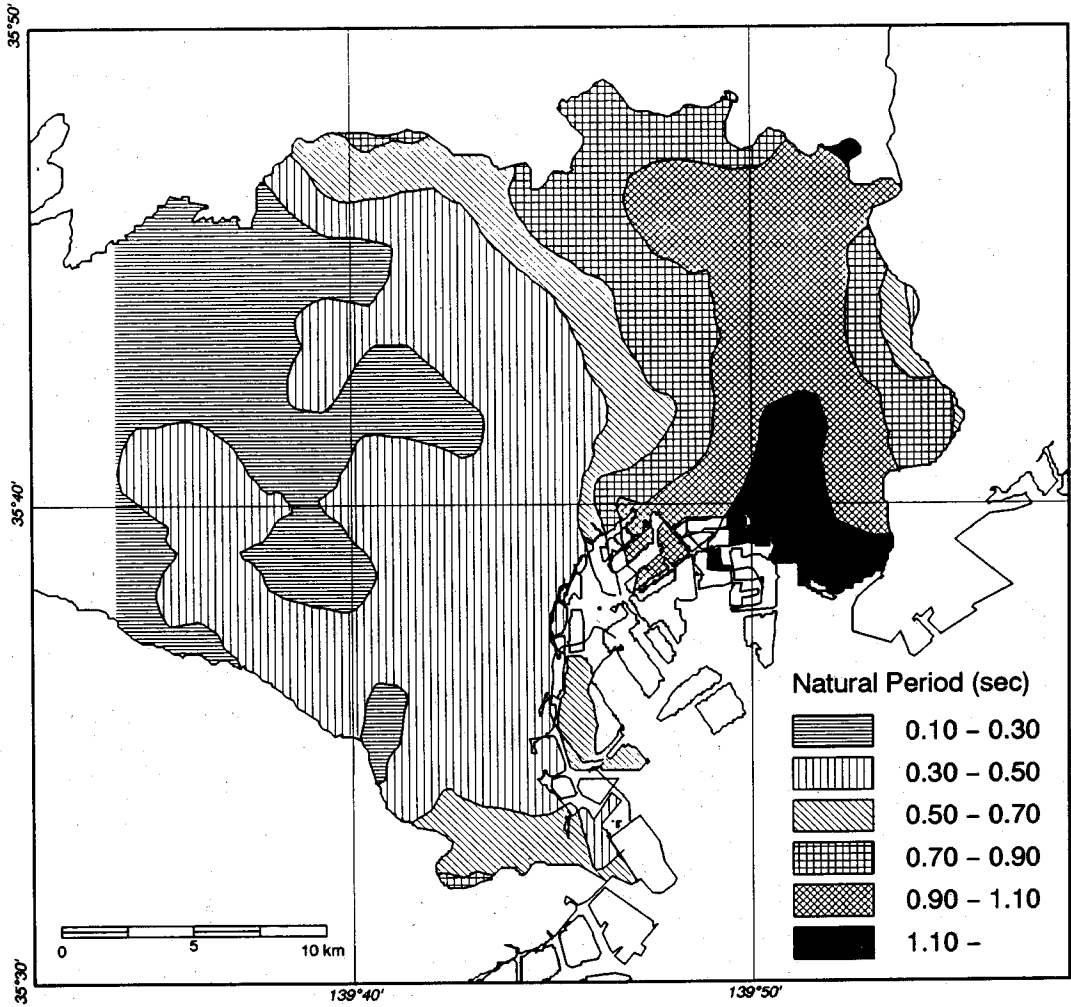
(2) 卓越周期マップの作成

図-10は、対象とした全546測点の位置と推定卓越周期を黒丸で示している。図示した546個の周期のうち530個(全体の約97%)については、周期範囲0.1~3.0秒で振幅比が最大となるピーク周期を機械的に読み取ったものと一致しているが、残りの16個(同3%)については振幅比スペクトルの形状から判断して最大ピークの周期とは異なる周期を採用した。図-10には国土数値情報<sup>11)</sup>から得られる表層地質を網掛けで示しているが、周期分布と地質分布との対応が良いことが分かる。たとえば、東経139度45分を境に卓越周期が明瞭に変化しているが、この境は武蔵野台地と沖積低地の境界にはほぼ対応している。

図-10は都区内の全中学校の推定卓越周期を示しているので、学校地震防災の観点から幅広い活用が考えられるが、本図を加工して卓越周期マップを作成し既存のマップと比較してみる。そのため、以下に述べる方法により各測定点の卓越周期を250m×250mの格子点上へ補間し、卓越周期の等値線を描くことにする。

補間方法として、ある格子点から半径Rの円を描き円内に含まれる測定点と円の中心までの距離をrとするとき、式(2)の重み関数w(r)をこの測定点の卓越周期に乘じ、式(3)で重み付き平均をとることにより、その格子点での卓越周期とする方法を考えた。ここで、 $T_i$ ,  $T_n$ ,  $r_{n,i}$ は、それぞれ格子点iの卓越周期、測定点nの卓越周期、格子点iと測定点nとの距離である。

$$w(r) = \begin{cases} 1 - r^2/R^2 & r \leq R \\ 0 & r > R \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$



図一11 東京都区部の常時微動から推定した地盤の卓越周期の等値線図

$$T_i = \frac{\sum_{n=1}^{N=546} T_n w(r_{n,i})}{\sum_{n=1}^{N=546} w(r_{n,i})} \dots \dots \dots (3)$$

図一11に、 $R=2500\text{ m}$ として算定した卓越周期マップを示す。この図から卓越周期が、荒川、隅田川、江戸川の下流域の下町低地と多摩川下流域の多摩川低地で長く、西部の武蔵野台地で短い傾向がよく分かる。また地形図と対比すれば、卓越周期が0.70秒以上の地域は埋没河岸段丘と埋没谷上に分布し、卓越周期0.50秒の等値線が低地と台地の境界とほぼ一致していることも分かる。

(3) 既存マップとの比較検討

既存の周期マップとして、たとえば田治米らによるもの<sup>12)</sup>がある。これは、東京23区を対象に1km×1kmにメッシュ分割し、741本のボーリング資料をもとにS波速度500m/sの層を基盤としてS波の重複反射理論

から増幅特性を求め、最大応答倍率と卓越周期の組み合わせによって8つのゾーンに分類したマップである。図一12は、このマップをもとに筆者らが卓越周期のみに着目して6つのゾーンに再構成したもので、周期区分は図一11と完全には一致していないが図一11と図一12の特徴は全般によく対応している。このことから、常時微動によって推定される周期が従来手法で推定される周期に比較して精度の面で見劣りしないこと、推定手順が明確になったので今後は経済性、作業性の利点を活かして多方面で積極的に利用される可能性が高まったことが指摘できよう。

5. 結 論

本論文では、常時微動を用いて地盤の卓越周期を推定する上で障害となっていた幾つかの問題点を解明した。それに基づいて卓越周期の具体的な推定手順を提案し、



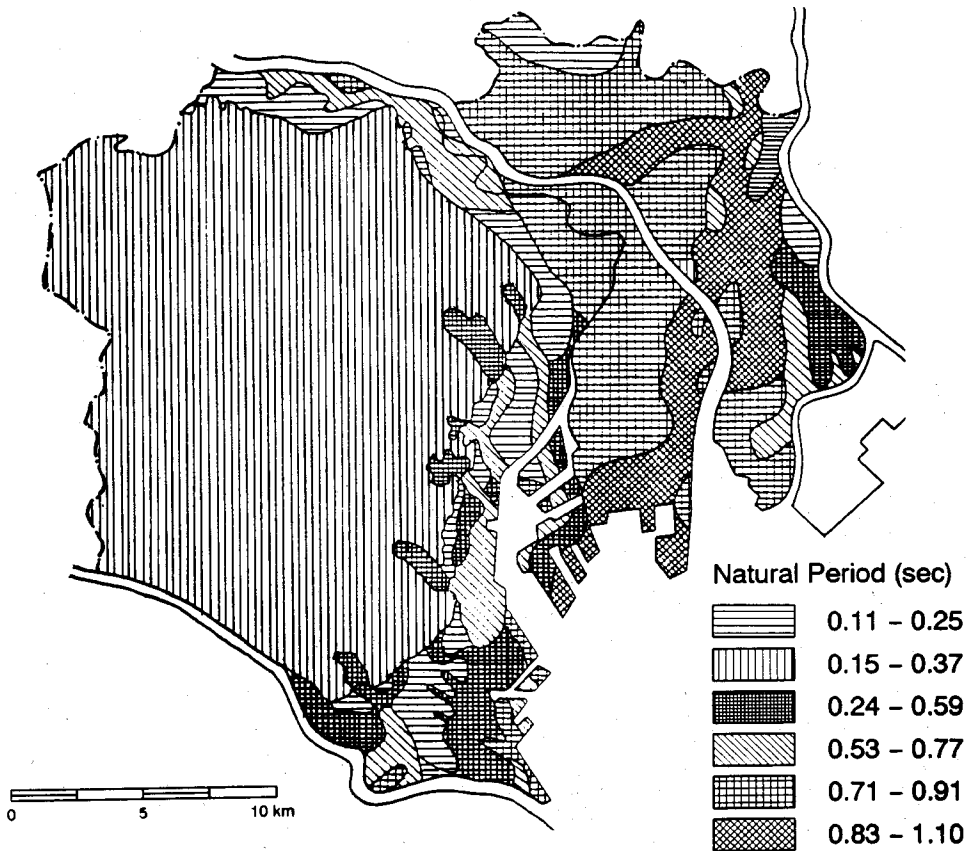


図-12 ボーリング資料から求められた東京都区部の地盤の卓越周期 (田治米ら<sup>12)</sup>によるものを再編成)

東京都区部の周期マッピングに適用して、その実用性を実証した。本論文で明かになった主要な点を列挙すると、次のようである。

- 1) 2層地盤におけるレイリー波の水平動と上下動の振幅比スペクトルは、インピーダンス比が1から減少するにつれてV字形、W字形および逆N字形の3つの特徴的形状を示す。多層地盤における振幅比スペクトルにはこれらの形状が複合してあらわれ、√字形が見られる場合も少なくない。
- 2) レイリー波の振幅比スペクトルが逆N字形やW字形のとき、その最大ピークを与える周期はS波の卓越周期のよい推定値を与える。
- 3) レイリー波の振幅比スペクトルで谷を与える周期は、ピーク周期と同様に重要な指標である。例えば、ピークと谷の周期比は約2であるので、振幅比スペクトルが鋭い谷形状を示すとき谷周期の2倍の周期付近がS波の卓越周期である。
- 4) 地盤のS波速度コントラストが弱い場合、レイリー波の振幅比スペクトルは平坦なV字形状となり、そのピーク周期とS波の卓越周期との対応がつけにくい。ただし、この場合にはS波の増幅特性自体が、堅

著なピークを示さないことにも留意する必要がある。

- 5) 一方、ラブ波の最大振幅を与えるエアリー相付近の周期は、地盤の速度コントラストが強い場合にはS波の卓越周期と一致し、コントラストが弱まるにつれてS波卓越周期の半分以下まで漸減する。
- 6) 常時微動にはレイリー波とラブ波が混在しているが、レイリー波の振幅比スペクトルにおけるピークと谷に関する上記の特徴は常時微動にも通用する。これをもとに、常時微動を用いる地盤の卓越周期の推定に、上記の特徴を活用する手順を提案した。
- 7) 東京都23区内の全中学校546校を測定点に選び、通算32日間で実測した常時微動データに上述の提案を適用して卓越周期マップを作成した。そして、それを既存のマップと比較検討することによって、本提案の実用性を実証した。

冒頭でも述べたように、常時微動によって地盤振動特性を推定する際の眼目は、卓越周期と増幅倍率の2点にある。本研究では前者のみを扱ったが、後者の推定方法を確立するためにも本研究の成果は有用と考えられる。

謝辞：本研究を遂行する上で多数の方々からご協力とご

便宜を賜った。特に、工学博士 中村 豊氏（鉄道総合技術研究所）、工学博士 翠川三郎氏（東京工業大学）、中村洋一氏（電源開発株式会社、当時 東京工業大学大学院生）からは、微動測定実施上の多大の支援を得た。厚くお礼を申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば, Allam, A. and Shima, E.: An investigation into the nature of microtremors, Bull. ERI, Vol.45, pp.43~59, 1967.
- 2) Udawadia, F.E. and Trifunac, M.D.: Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California, Bull. BSSA, Vol.63, No.4, pp.1227~1253, 1973.
- 3) 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, pp.265~270, 1986.
- 4) たとえば, 中村 豊・大町達夫・年縄 巧: 常時微動により推定した地盤震動特性と地震被害の関係, ロマブリータ地震震害調査報告, 土木学会論文集, No.424, III-14, pp.37~51, 1990.
- 5) 中村 豊: 常時微動を用いた地盤・構造物の特性調査手法, RRR (Railway Research Review), 1992.9.
- 6) Kanai, K. and Tanaka, T.: On microtremor, 甞, Bull. Earthquake Research Institute, 39, pp.97~114, 1961.
- 7) 日本建築学会構造委員会振動運営委員会地盤振動小委員会: 微動の工学的利用について —その現状と可能性—, 第17回地盤震動シンポジウム, 1989.
- 8) 時松孝次・宮寺泰生: 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 第439号, pp.81~87, 1992.
- 9) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, p.205, 1976.
- 10) 大町達夫・茂木秀則: 振動学的手法による Rayleigh 波の再定式化へのアプローチ (II)—2層弾性地盤について—, 東京工業大学土木工学科研究報告 No.43, pp.59~122, 1991.
- 11) 国土庁計画調整局・国土地理院: 国土数値情報, 国土情報シリーズ2, 大蔵省印刷局, 1987.
- 12) 田治米辰雄・望月利男・松田磐余: 地盤と震害, 槇書店, pp.65~69, 1977.

(1993.6.14 受付)

## REFINEMENT AND APPLICATION OF AN ESTIMATION PROCEDURE FOR SITE NATURAL PERIODS USING MICROTREMOR

Tatsuo OHMACHI, Katsuaki KONNO, Tatsuya ENDOH and Takumi TOSHINAWA

Based on recent studies suggesting that Rayleigh waves are observable in microtremor ground motions, an improved procedure is proposed to estimate a natural period of a site using amplitude ratios between horizontal and vertical motions of the microtremors. The procedure is to make the best use of not only peaks but also troughs in a spectral amplitude ratio. Using microtremor data measured at all junior high schools in 23 wards of Tokyo, the proposed procedure is applied to a period-mapping of the area and compared with an existing map to a satisfactory level of accuracy, demonstrating its practicality.