

## 地盤内常時微動の周期，振幅特性

谷口 仁士・坪井 利弘・正木 和明・飯田 汲事

### Period and Amplitude Characteristics of Microtremors in Surface Layers

Hitoshi TANIGUCHI, Toshihiro TSUBOI,  
Kazuaki MASAKI and Kumizi IIDA

飛島，十四山公園，高木，千音寺の計4地点の小，中学校および公園において地盤内常時微動測定を行い，地盤内の周期，振幅特性を求めた。その結果，周期特性に関しては地質，深度の変化による影響は比較的小さかったが，振幅特性については地質の変化による影響が大きく，沖積層内での深度方向の振幅比の変化は指数関数的な減衰あるいは増大を示していることがわかった。この地盤のS波速度は約 200m/secであった。また洪積層地盤内でもS波速度が上記のような値を示すところでは，振幅比の変動も大きいことがわかった。

#### 1. はじめに

過去の巨大地震による災害の壮絶さは実に生々しい記録を今日に伝えている。今日では50数年前とは異なり，人口の一点集中化が激しく，大都会の近くで起こる地震動災害の規模は想像を絶するものになるだろう。濃尾平野も明治以降では，濃尾（1891），東南海（1944），三河（1945）地震に襲われ大被害を被った地域である。将来この規模の地震が濃尾平野を襲うことは必至であり，早急に地震動災害の防災を総合的に研究する必要性にせまられている。地震動災害の防災を総合的に研研するにはいろいろな項目が考えられるが，特に工学の分野においては地盤の振動特性の研究が挙げられよう。

一般に地表で測定された地震波の振動特性  $E(\omega)$  は概念的に次のように表わされる。すなわち，地震の発生機構に基づく震動特性（規模，震源の深さ，位置）を  $S(\omega)$ ，地震波の伝搬経路で生じる震動特性（径路における波の反射，屈折等）を  $C(\omega)$ ，伝達した地盤構造に基づく振動特性（地盤の剛性率，軟弱層の厚さ）を  $G(\omega)$  とすると，その地盤の地震波の振動特性はこれらの積で示される。すなわち，

$$E(\omega) = S(\omega) \cdot C(\omega) \cdot G(\omega)$$

である。最近の報告<sup>1),2)</sup>によれば，地盤の強振動特性は  $S(\omega)$ ， $C(\omega)$  より  $G(\omega)$  に極めて強く支配されるといわれている。

筆者らも数年前より  $G(\omega)$  に注目し，ほぼ濃尾平野全域にわたって地盤の振動特性の調査を行ってきた<sup>3)</sup>。しかし，これらの調査は全て平面的に行ったものである。真に地盤の振動特性  $G(\omega)$  を把握するためには  $G(\omega)$  を多方面からとらえなければならない。その一環として三次元的な地盤の振動特性を研究するため，地盤内常時微動の測定を行った。また，元来あまり行われていなかった微動を主体とした振幅の研究，測定地点におけるS波速度についても調査したので合わせて述べることにする。

#### 2. 測定法および解析法

微動の測定法，解析法および本研究で用いた術語の定義について述べる。

図1に測定場所を示した。図中の測定場所における測定方法などについては表1に示されている。

##### 〔A〕測定機器および解析機器

本研究において用いた地中地震計は水平1成分の動コイル型 Pick up であり，その特性は固有周期1秒で，感度は1.1v/kine，コイル抵抗は10.34K $\Omega$ ，制動抵抗はC-RADJ，測定周波数帯域は0.5~30Hzである。増幅器はTA-400型を使用し，地震計との総合特性は1~30Hzではほぼ平坦な感度特性となっている。この増幅器を加えた総合周波数特性曲線を図2に示す。

周波数解析に用いられた解析機器は実時間デジタル型

表1 測定場所および測定システム

Site No.	測定場所	地質状況 (沖積層厚, m)	測定システム
A	海部郡飛鳥村飛鳥中学校	38.5	地中1成分(水平) 地表1点3成分(水平2成分, 上下1成分)
B	海部郡十四山村十四山西公園	37.0	地中1成分(水平) 地表1点2成分(水平動のみ)
C	名古屋市港区高木町高木小学校	10.2	地中1成分(水平) 地表1点2成分(水平動のみ)
D	名古屋市中川区富田町 千音寺小学校分校	22.0	地中1成分(水平) 地表3点3成分(水平2成分, 上下1成分)

相関計とスペクトラム・アナライザーである。実時間デジタル型相関計は信号遅延時間の分解能 $\Delta\tau$ が0.2msから200sまでの自己および相互相関関数を計算できるものである。またスペクトラム・アナライザーは上記の相関関数をフーリエ変換する装置で、時間領域の統計量である相関関数を周波数領域に変換するものである。

#### 〔B〕測定法概要

地盤内の振動性状を測定するために各地点で内径75mmの調査孔を掘削し、地中地震計をその孔中に設置した。地震計の調査孔壁設置方法は地震計ユニットを内蔵した円筒外側のゴムチューブを水圧により膨張させることによって行った。またこの地震計は傾斜修正装置を内蔵しており、最大修正可能角度は $\pm 5^\circ$ である。これより大きく傾いた場合は設置のしなおしを行って水平に設置した。微動の測定時間は各深度において10分間とし、地中と比較するために地表において3成分(水平2成分, 上下1成分)の微動を同時測定した。

#### 〔C〕解析法概要

解析法概要とともに本研究で用いられている術語の定義を下記に述べる。

##### (1) 卓越周期の解析

相関計とスペクトラム・アナライザーより算出するパワースペクトル法を用いた。この方法は自己相関関数をフーリエ変換し、パワースペクトルを求め、このパワースペクトルより各深度の卓越周期を決定した。

##### (2) 平均周期の解析

観測記録を0.5Hzのハイパスフィルターを通しペンレコーダーに波形を書かせ、Zero-Crossing法を用いて周期を読み、単純平均したものである。なお波形の読み取り個数は50個である。

##### (3) 最大周期の解析

平均周期を求めるとき書かせた波形についてその中で最大となる周期を最大周期とした。

##### (4) 平均振幅の解析

観測記録をフィルターを通さないで1分間人為的ノイ

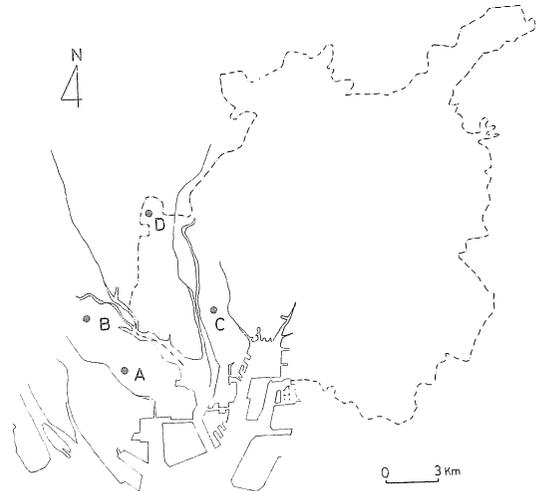


図1 地盤内常時微動の測定場所

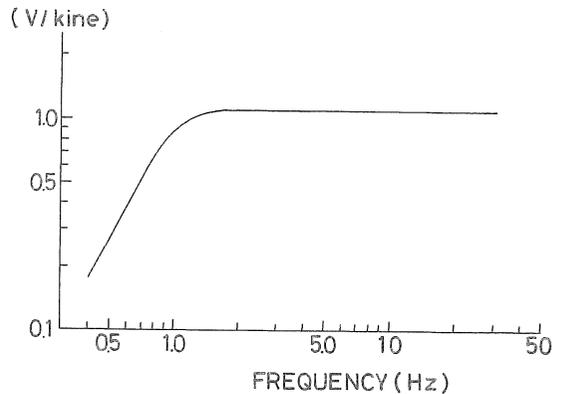


図2 地中地震計と増巾器との総合特性

ズの無いと思われる所の波形をペンレコーダーに書かせ、その記録を4秒ごとに15個に区切り、各々の中より最大となる振幅を読み取り単純平均したものである。

##### (5) 最大振幅の解析

平均振幅を求めるときに用いた波形の中で最大となる振幅を最大振幅とした。

##### (6) 平均振幅比

地表の平均振幅と地中の平均振幅の比で定義したものである。すなわち地表の平均振幅を $A_H$ ，任意の深度における平均振幅を $A_D$ とすれば $A_D/A_H$ で表わしたものである。

(7) 最大振幅比

平均振幅比と同様に，地表の最大振幅を $M_H$ ，任意の深度における最大振幅を $M_D$ とすれば $M_D/M_H$ で定義したものである。

(8) 振動振幅比

最大深度における平均振幅を $B_A$ ，任意の深度における平均振幅を $D_A$ とし， $D_A/B_A$ の値を振動振幅比とした。

3. 解析結果

〔I〕 飛島中学校

この地点の土質柱状図およびS波速度<sup>4)</sup>(以下 $V_s$ と記す)の分布を図3(a)に示した。N値は深度36mまでは非常に小さい。38m以深においては46m，60m深度付近で比較的小さいがその他の深度では大きく50以上にもなっている。 $V_s$ は深度の増大とともに大きくなり，地表付近では96m/sec，深度2.6m~22.2mまでは116 m/sec それ以深37.4mまでは180m/sec，37.4m以深では302 m/secとなっている。この地盤は0m~36m付近までが軟らかい沖積層で，36m以深が洪積層となっている。

(i) 地表および地中の卓越周期

地表および地中における振動記録の周波数解析を行った結果を図3(b)に示した。図中の白丸印は卓越周期，黒丸印は平均周期を表わしている。卓越周期は0.33~0.36

秒の帯域において存在し，深度の変化による卓越周期の変動は小さい。平均周期については，深度40m以深において卓越周期より大きくなり，その値は0.45~0.55秒である。深度40m以浅についてはほぼ卓越周期と一致している。

(ii) 地表および地中の振幅

今，任意の深度で測定された振幅 $A(\omega)$ は，振動源の強さを $H(\omega)$ ，地盤の振幅特性を $I(\omega)$ ，伝搬径路による特性を $J(\omega)$ ，測定計器の特性を $L(\omega)$ とすれば，一般に $A(\omega)$ は

$$A(\omega) = H(\omega) \cdot I(\omega) \cdot J(\omega) \cdot L(\omega) \quad (1)$$

で表わすことができる。ここで任意の瞬間的な時間においては， $H(\omega)$ は定常的とななされ， $J(\omega)$ についてもある波動の伝搬径路は一定とみなされる。したがって測定計器の特性 $L(\omega)$ が既知なものをを用いれば，任意の深度において測定された振幅を $A'(\omega)$ とすると

$$A'(\omega) = H(\omega) \cdot I'(\omega) \cdot J(\omega) \cdot L(\omega) \quad (2)$$

で表わされる。ただし， $I(\omega)$ は最大深度(64m)地点の地盤の振幅特性であり， $I'(\omega)$ は任意の深度の地盤の振幅特性である。 $A'(\omega)$ と $A(\omega)$ との比 $A'(\omega)/A(\omega)$ は式(1)，(2)より

$$A'(\omega)/A(\omega) = I'(\omega)/I(\omega)$$

となる。よって振幅比は地盤の振幅特性の比となり，この振幅特性の比を地盤の増幅度と考えることができる。

図3(c)に平均振幅，最大振幅を，図3(d)に平均振幅比，最大振幅比そして図3(e)に平均および最大振動振幅比を

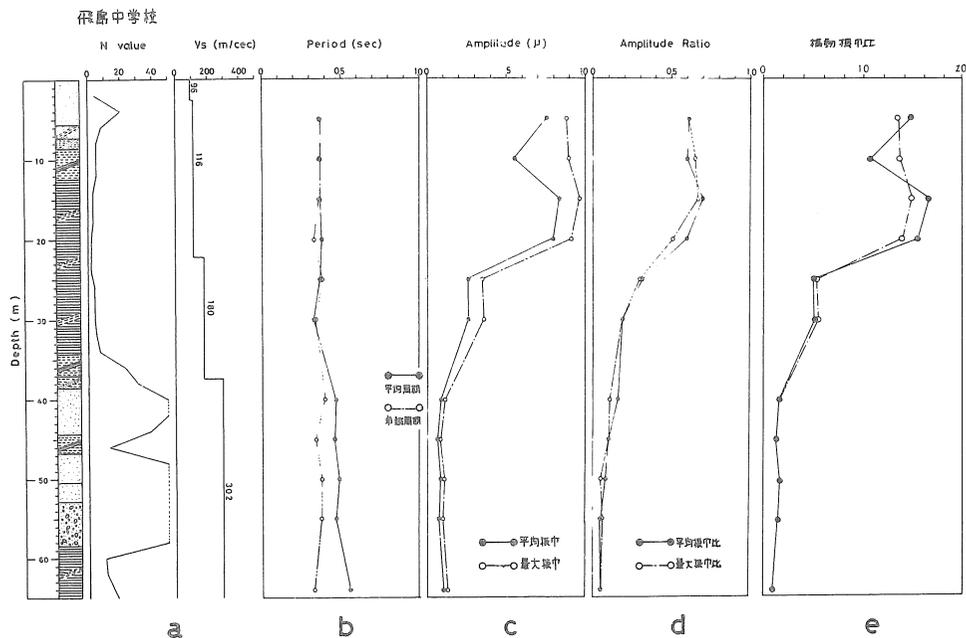


図3. 飛島中学校におけるN値，S波速度および地盤内常時微動の特性

それぞれ示した。図中の黒丸印は平均振幅，振幅比として振動振幅比を表わし，白丸印は最大振幅，振幅比および振動振幅比を表わしている。

図3(c)に示すように，平均振幅は深度約20mまでは約 $8\mu$ 程度の振動振幅が見られる。深度25m~35mでは振幅は $3\mu$ 程度で40m以深では $1\mu$ 内外となっている。最大振幅についても平均振幅の地盤内分布と同様な状況を示し，その値は平均振幅の約10%程度大きい。

平均振幅と最大振幅の深度方向に対する減衰は深度20m以深において指数関数的な減衰を示している。

次に図3(d)に示した地表と地中の振幅比については，平均振幅比も最大振幅比も深度方向に対し同一の減衰形状を示し，深度15m付近までの振幅比は地表の0.6~0.7倍程度で深度方向に対する減衰はみられないが，それ以深においては指数関数的な減衰を示している。

図3(e)の振動振幅比においても深度方向の減衰形状は前述の平均振幅の形状と似ている。深度40m以深の地盤内 ( $V_s=302\text{m/sec}$ ) ではほとんど増幅を示さないが，それ以浅の地盤内 ( $V_s=116\text{m/sec}$ ,  $180\text{m/sec}$ ) では急激な増幅を示している。

また周波数によって振動性状がどのように異なるかを示したのが図4である。これは各々の周波数について，各深度ごとに平均振幅，最大振幅を求め，最大深度を1.0としたときの任意の地盤内での振幅比を表わしたも

のである。図からわかるように， $1.0\sim 10.0\text{Hz}$ の帯域においてその振動性状は3次mode的である。またどの周波数帯域でも，沖積層内の増幅度は全般に大きい値を示すが，特に深度20m付近において大きく，その値は深度64mの地点の約5~10倍になっている。この地盤の卓越周期付近の周波数である $3.15\text{Hz}$ についてはどの周波数帯域の増幅度よりも大きく，深度20mでの平均振幅比で約7.5倍，最大振幅比で約16倍にもなっている。深度36m以深の洪積地盤における振幅比の変動はどの周波数帯域についても比較的深度に関係ないようである。

## 〔II〕 十四山公園

この地点の土質柱状図および $V_s$ の分布を図5(a)に示す。この地点の地質は深度37mまでが沖積層で $V_s$ は $150\text{m/sec}$ 前後となっている。深度37m以深は洪積層で67mまでが大曾根層，それ以深は熱田層である。 $V_s$ は大曾根層内で $220\text{m/sec}\sim 320\text{m/sec}$ ，熱田層内で $400\text{m/sec}$ となっている。

### (i) 地表および地中の卓越周期

地表および地中における振動記録の周波数解析を行った結果を図5(b)に示す。図中の記号は飛鳥中学校の場合と同じである。この地点における卓越周期は $0.62\sim 0.68$ 秒の帯域にあって，深度に関係なくほぼ一定の値となっている。平均周期についても卓越周期と同様な現象を示すが，その値は卓越周期に比べて0.1秒前後小さくなっ

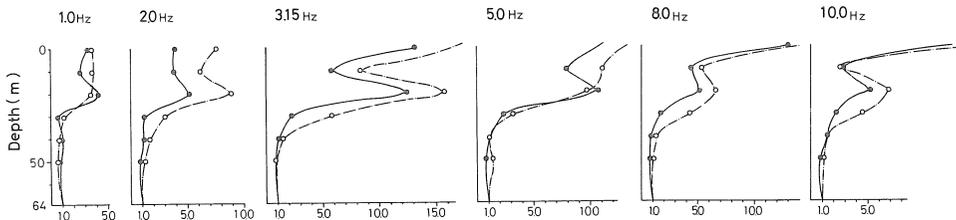


図4. 飛鳥中学校における周波数別振動振幅比

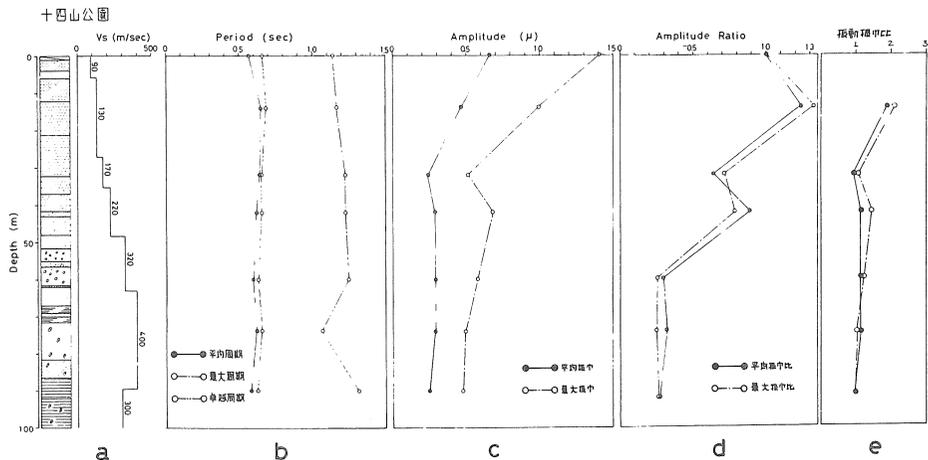


図5. 十四山公園におけるN値，S波速度と地盤内常時微動の特性

ている。

(ii) 地表および地中の振幅

図5(c)に平均振幅, 最大振幅, 図5(d)に平均振幅比, 最大振幅比, 図5(e)に平均および最大振幅比をそれぞれ示した。

図5(c)に示した平均振幅の減衰形状に注目すると, 深度32mまでの沖積層内では直線的に減衰するが, それ以深の沖積層および洪積層内ではほとんど減衰を示していない。地表における平均振幅の値は約 $0.65\mu$ , 深度32mで $0.24\mu$ , 深度90mで $0.24\mu$ となっている。また最大振幅についてもその減衰形状はほとんど平均振幅の場合と同じであるが, 最大振幅値は地表で約 $1.4\mu$ , 深度32mで $0.5\mu$ , 深度90mで $0.48\mu$ と平均振幅の約2倍の値となっている。

図5(d)の地表と地中の振幅比については, 平均振幅比も最大振幅比も深度方向に対する減衰形状はほとんど同じである。深度60mまではほぼ指数関数的な減衰を示すが, それ以深ではほとんど減衰を示していない。深度60mでの平均および最大振幅比の値はそれぞれ0.29, 0.25倍である。

図5(e)の振幅比においても前述の振幅比の形状と似ている。深度約42m以深の地盤内 ( $V_s=220\text{m/sec}$  ~

$300\text{m/sec}$ ) ではほとんど増幅を示さないが, それ以浅 ( $V_s=90\text{m/sec}$ ~ $170\text{m/sec}$ ) の地盤内では急激な増幅を示している。その値は深度14mで2倍となっている。

図6に $1.0\text{Hz}$ ~ $10.0\text{Hz}$ までの帯域における振動性状を示した。図より $3.15\text{Hz}$ ~ $8.0\text{Hz}$ までの周波数帯域においては1次mode的であるが,  $1.0, 2.0\text{Hz}$ および $10.0\text{Hz}$ の帯域については3次mode的である。沖積層内平均振幅振幅比は $3.15\text{Hz}$ ~ $8.0\text{Hz}$ の帯域で大きく, その値は4倍以上となっている。洪積層内における振幅比は平均, 最大ともどの周波数帯域についても増幅されていないようである。

〔Ⅲ〕 高木小学校

この地点の土質柱状図,  $V_s$ 分布図<sup>5)</sup>を図7(a)に示す。この地点は深度10.2mまでが沖積層で,  $V_s$ は $130\text{m/sec}$ 以下であって比較的軟弱な地盤と思われる。またN値も20以下となっている。深度10m以深の洪積層内での $V_s$ は深度20mまでが $200\text{m/sec}$ , 深度50m~65mそして80m以深は $V_s=190\text{m/sec}$ ~ $210\text{m/sec}$ と洪積層であるが比較的軟弱であると思われる。上記以外の深度については $V_s=330\text{m/sec}$ 以上となっている。

(i) 地表および地中の卓越周期

地表および地中の卓越周期, 平均周期を図7(b)に示し

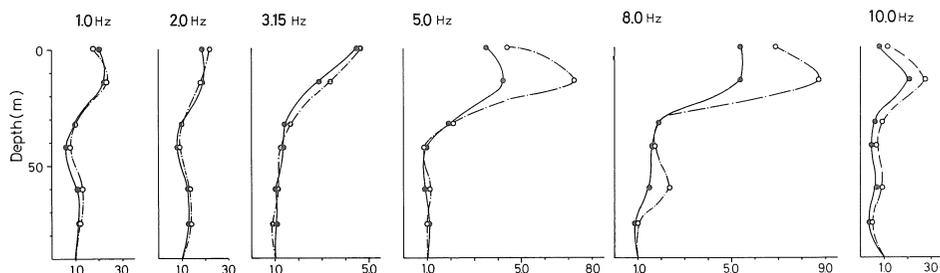


図6. 十四山公園における周波数別振幅比

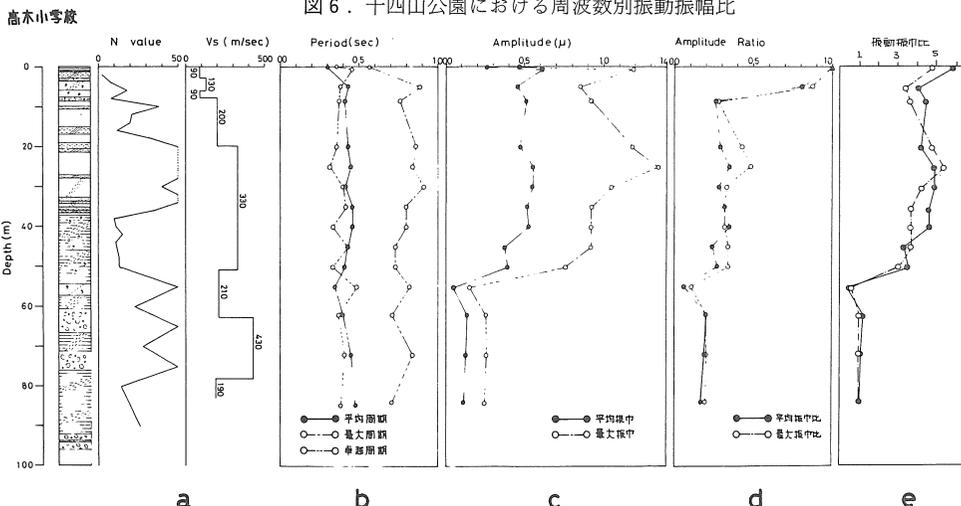


図7. 高木小学校におけるN値, S波速度と地盤内常時微動の特性

た。この図よりわかるように地中の卓越周期の変動は大きい。その変動帯域は0.31~0.48秒となっている。平均周期は地表では0.3~0.4秒秒であるのに、地中では0.4~0.5秒と長くなっている。

(ii) 地表および地中の振幅

図7(c)に平均振幅, 最大振幅, 図7(d)に平均振幅比, 最大振幅比, 図7(e)に平均および最大振幅振幅比をそれぞれ示した。

図7(c)に示す平均振幅の減衰形状は深度40m~55mの間で指数関数的に減衰するが, その他の深度における減衰はほとんどない。地表における平均振幅の値は $0.27\mu$ , 深度40mまでは $0.55\mu$ と地表より大きい。また深度55m以深においては $0.2\mu$ 内外となっている。最大振幅の減衰形状は深度20m~30mを除いた地点で平均振幅とほぼ同じ形状を示す。しかし深度20m~30mの地点では地表の最大振幅の約3倍の振幅値を示している。

図7(d)の振幅比については, 平均振幅比も最大振幅比も深度方向にほぼ同じ変動を示す。深度10m以浅と深度50m~55mの地盤内のみ減衰が大きく, その他の地盤内では小さい。平均振幅比, 最大振幅比の値は深度5mから10mに変わる地点でそれぞれ4.32倍から1.40倍に, 4.46倍から1.44倍に減衰している。

図7(e)の振動振幅比をみると, 深度62m以深の増幅度は小さいが, それ以浅の地盤内では地表に向かって徐々に大きくなっている。その中でも急激に増幅されるのは深度50m~55mの地層で,  $V_s$ は210m/secとなっている。

飛鳥, 十四山公園の地点においては深度方向に向って $V_s$ は徐々に大きくなっているが, この地点においては深度の途中で $V_s$ が小さくなっている。この $V_s$ の小さい

( $V_s=210\text{m/sec}$ ) 地盤内において増幅された振動振幅はそれ以浅で,  $V_s$ の大きい( $V_s=330\text{m/sec}$ ) 地盤内を通過するときでも減衰を示さず, 増幅されたままの値を保っている。すなわち, 表層が硬い地盤であっても深度60m前後において $V_s$ の小さい地盤が存在すれば, 振動はその地盤内で増幅され地表に現われるものと思われる。

図8に1.0Hz~10.0Hzまでの帯域における振動性状を示した。図より1.0Hz~3.15Hzの周波数域における振動性状は1次mode的であるが, 5.0Hz以上については, 2次もしくは3次mode的である。洪積層より沖積層に変わる深度10m前後の地盤内では, 1.0Hzの振動振幅比は増幅されるが2.0Hz以上の帯域については逆に減衰を示している。どの周波数帯域についても共通していることは, 深度40.0m~60.0mの地盤内で急激な増幅を示していることである。

〔IV〕 千音寺小学校

この地点での土質柱状図および $V_s$ 分布図を図9(a)に示す。図からわかるようにN値は深度20m以深で急激に大きくなり,  $V_s$ も深度18m付近より200m/secとなっている。ここで得られた各深度での水平成分(B)と地表での水平成分(H)の波形を図10に示した。

(i) 地表および地中の卓越周期

地表および地中における振動記録の周波数解析を行っ

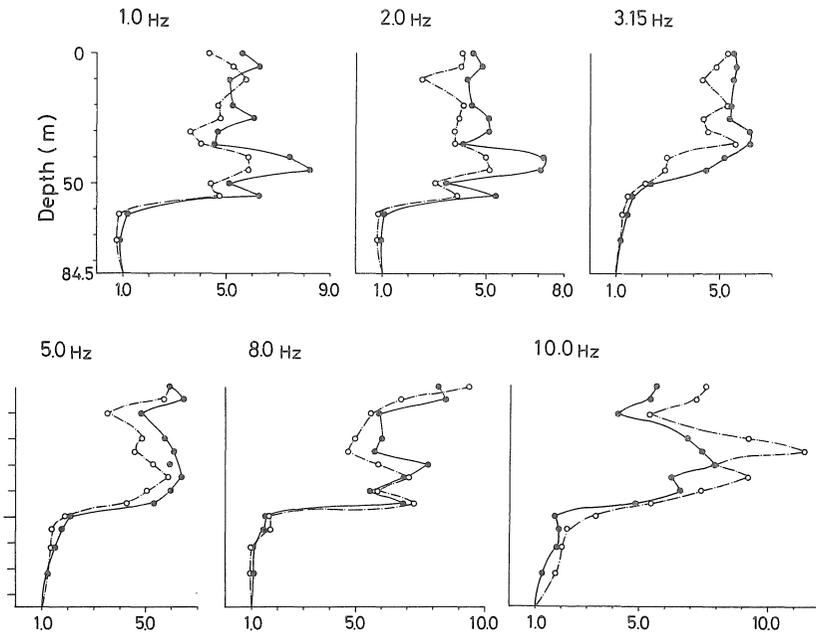


図8. 高木小芳校における周波数別振動振幅比

た結果を図9(b)に示す。図に示すように卓越周期の地中方向への変動は深度20mで0.3秒であるが、地表およびその付近と深度38mの地点では約0.5秒~0.6秒となっている。

(ii) 地表および地中の振幅

図9(c)に平均および最大振幅, 図9(d)に平均, 最大振動振幅比をそれぞれ示した。

図9(c)に示したように振幅の深度方向に対する減衰は指数関数的になり、深度21m以浅の沖積層内ではその指数が大きくなり、21m以深では小さくなっている。深度5mにおける平均振幅の値は $0.04\mu$ 、深度20mで $0.03\mu$ 、最大深度38mで $0.02\mu$ となっている。また各深度における最大振幅は平均振幅の約1.3倍の値を示し、その減衰曲線はほぼ同様とみなされる。

図9(d)の振動振幅比からわかるように、深度5mの沖積層内で増幅度は2倍にとどまっている。この沖積層の $V_s$ は130m/sec前後である。洪積層内における平均, 最大振動振幅比の変化はほとんど見られない。

SENONJI

図11に1.0Hz~10.0Hzの各周波数における振動性状を示した。この地点では総ての周波数帯域において、その振動性状は1次mode的であり、沖積層内で急激に増幅されている。その増幅度の大きい帯域は、平均振動振幅比で2.0Hzの4.0倍、最大振動振幅比も2.0Hzの7.88倍であった。

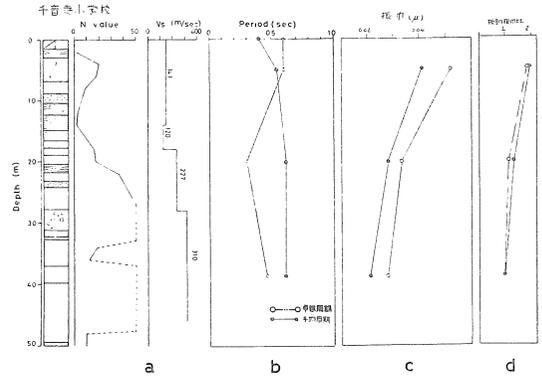


図9. 千音寺小学校におけるN値, S波速度と地盤内常時微動の特性

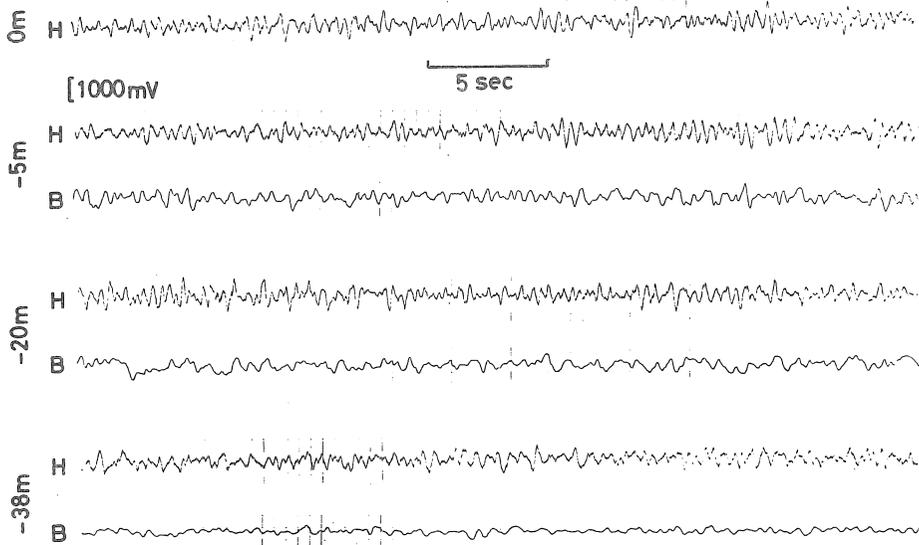


図10. 千音寺小学校で測定された微動の波形

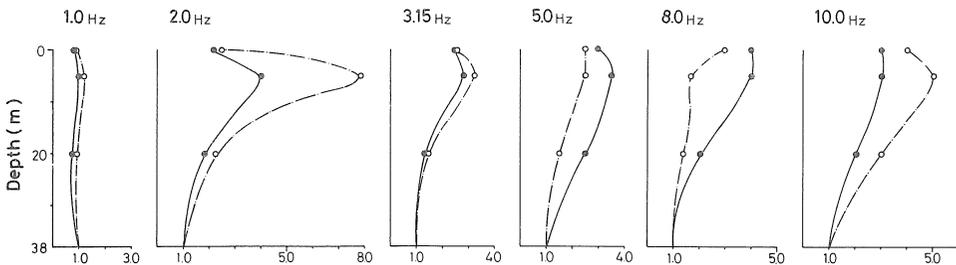


図11. 千音寺小学校における周波数別振動振幅比

#### 4. まとめ

以上4地点における地盤内常時微動の振動性状を周期、振幅について地盤内S波速度分布を考慮に入れ調べた結果次のようなことが明らかになった。

- 1) 周期特性に関しては地層の変化による影響は比較的小さいようである。
- 2) 振幅特性、特に深度方向における地表と地中の振幅比および最大深度の振幅を1.0としたときの任意の深度における振幅は、深度方向に対し指数関数的に変化し、沖積層と洪積層の境界で減衰率もしくは増幅度が急激に変化するようである。しかし、洪積層地盤内においてもS波速度の小さい地層内では上記と同様である。
- 3) S波速度と減衰率および増幅度との関係は、S波速度が約200m/sec以下の地層内で減衰率、増幅度の変化が急激になるようである。このS波速度200m/sec以下の地層が洪積地盤内に存在している場合でも、上記のような現象が見られた。また、この現象が生じるための深度は60m～70m以浅内であると思われる。
- 4) 周波数1.0Hz～10.0Hzの帯域における振動性状は1次～3次mode的であり、沖積層内で急激な増幅を示すことがわかった。

今後もP、S検層と併せて地盤内常時微動の測定を行い、またS波の重複反射、表面波の理論振幅比との対応をも考慮に入れ、多角的に地盤の振動特性を研究したいと考えている。

終りにのぞみ、調査遂行上種々の援助を給った名古屋市民局災害対策課の方々並びに飛鳥中学校、高木小学

校、千音寺小学校当局に対して深く感謝する。また測定および解析に助力された愛知工業大学土木工学科の学生松本誠氏並びに建設試験工務株式会社大滝忠雄氏に感謝する次第である。

なおこの研究の一部は文部省の自然災害特別研究費によることを付記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 土田肇，上部達生：地表における強震記録より推定した基盤の地震動の特性，港湾技術研究所報告，第11巻，第4号，P195～259，1972。
- 2) 浅田秋江，河上房義：地盤震動特性に関する二、三の考察，土木学会論文報告集，第236号，P93～107，1975。
- 3) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士：名古屋地方における常時微動観測による地盤の振動特性と震害，第13回自然災害科学総合シンポジウム，P127～128，1976。
- 4) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士：地盤沈下地域の地中における自動車振動分布の測定，地盤沈下の実態とその対策に関する調査研究報告書（第二報），愛知県環境部，P151～162，1976。
- 5) 飯田汲事，正木和明，楓重彦，坪井利弘：名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第5報）——地盤の振動特性と震害一，名古屋市防災会議（地震対策専門委員会），P25～28，1978。
- 6) 飯田汲事，正木和明，楓重彦：名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告（第4報），名古屋市防災会議（地震対策専門委員会），P15～16，1977。