

地盤の振動特性と地盤種別判定法

飯田 汲事・正木和明・谷口仁士

An Interpretation Method for Classification of Subsoil Conditions Related to Measurement of Microtremors.

Kumizi IIDA, Kazuaki MASAKI and Hitoshi TANIGUCHI

常時微動を水平成分および上下成分において測定し、それらの卓越周期を求め、地盤構造と対比させることによって地盤種別を判定する方法を提案した。地盤構造を大きく4種に分け、各々の地盤上で水平成分と上下成分の卓越周期の相互関係を調べた結果、沖積層が厚くなるにつれて水平成分と上下成分の卓越周期の分離現象が生じ始め、沖積層厚21m以上の地盤において完全に分離するようになった。この現象に注目し、名古屋市におけ地盤をこの新たな判定法により地盤種別を行った。

1. はじめに

同じ地震を観測した場合、近接している地点でもその場所の地盤構造の相違により、地震波形の異なることは、地震動が記録できるようになってから直ちに気づかれた事実である。この現象は地震記録を比較してみるまでもなく大地震の被害記録¹⁾を解析することにより、一般に固い地盤上より軟弱な地盤においてその被害が大きいことから容易に推定できよう。近接している地点では少なくとも地下深くにおいては地質が同じであるため、同じ波形の地震波が入射しているはずであるから、地表面で観測される地震波形の相違は、主に地表付近に分布している軟弱地盤の影響によるものと考えられる。言いかえれば、地表面で測定された地盤の振動性状を解析することにより、基盤上にある地盤構造を推定できるはずである。

金井は²⁾³⁾固有周期1秒の地震計を用い、常時微動の測定を行ない、水平成分の卓越周期、振巾特性による地盤種別の判定法を提唱した。

筆者らは、名古屋市地盤を中心とする濃尾平野の常時微動測定結果から、金井による判定法を用いて地盤種別の判定を行なったところ、大体この方法で種別判定できるが、若干この判別⁴⁾⁵⁾できない場所が生じた。

一方、最近の報告によれば、微動は表面波の一種であ

ろうと考えられている。筆者らも微動が表面波の特性を有することを既に確認してきた⁶⁾。表面波の極小群速度を与える周波数—その地盤上での卓越周波数—は地盤構造、地盤物性に依存していることが知られているが、水平成分のみならず上下成分をも考慮しようとする研究が⁷⁾発達になってきた。筆者らも上下成分に注目し、水平成分の卓越周期と上下成分の卓越周期との関係が、地盤構造と密接な相関をもつ事実を見いだした。この事実重点を置き、金井による地盤種判定法とは異なった判定法を作成したのでここに報告する。なお、微動の測定及び解析方法については前回発行された研究報告⁷⁾によるものとする。

2. 地盤の振動特性

地盤構造を大きく、基礎地盤（基礎岩盤）、洪積地盤、沖積地盤に分け、特に沖積地盤についてはその層厚を0 m～10.0 m, 10.1 m～20.0 m, 20.1 m以上の3つに区分した。また微動の振動性状の分類としてスペクトル型分類、卓越周期による分類などを示した。

a) 基礎地盤

図1にこの地盤上で得られた微動のパワースペクトルの形態を示す。このスペクトルは水平、上下成分とも5.0 Hz付近に先鋭度の大きいピークを持ち、明らかにこの地

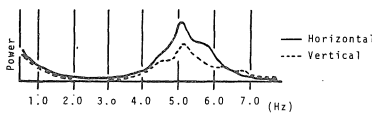


図1 基礎地盤上のパワースペクトル

盤上で測定された微動の波動構成はシンプルであると考えられる。上記のパワースペクトルよりこの地盤の卓越周期は、水平、上下成分ともほぼ一致しその値は0.2秒である。

b) 洪積地盤

図2にこの地盤上得られた微動のパワースペクトルの形態を示す。このパワースペクトルは水平、上下成分と

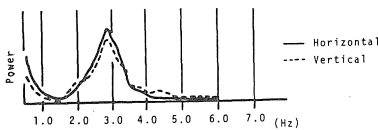


図2 洪積地盤上のパワースペクトル

も2.8 Hz付近にピークを持ち、基礎地盤の振動特性と同様にその波動構成はシンプルであると言える。この地盤の卓越周期は0.36秒となっているが、もう少し詳しくこの地盤上で測定された卓越周期の分布状態を調べてみると、図3に示したように卓越周期が分布している。図3

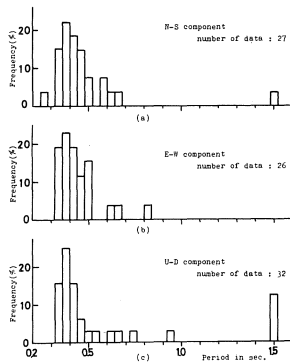


図3 洪積地盤上における卓越周期の頻度分布

(a)にはNS成分の卓越周期の分布が示してある。この成分の卓越周期は0.361～0.400秒の帯域に分布する確率が他の帯域に比べて大きく、その値は22%である。図3 (b)のEW成分についてもNS成分と同様、0.361～0.400秒の帯域に分布する確率が大きく、その値は25%である。図3 (c)のUD成分も水平2成分と同じ帯域で分布確率が大きく、その値は25%である。

水平2成分の卓越周期の平均値の分布を図4に示す。但し、測定地点において卓越する周期が2つ以上ある場

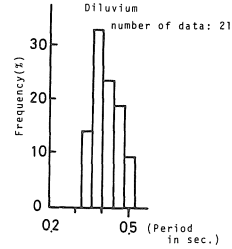


図4 洪積地盤上における平均卓越周期の頻度分布

合、それらの中の最も小さい方を選び、NS成分とEW成分を単純に平均し算出した。この卓越周期の平均値は、0.361～0.400秒の帯域に分布する確率が最も大きく、その値は33%となっている。

水平成分の卓越周期の平均値(以下 T_{N-E} と記す)と上下成分(以下 T_U と記す)との相関を図5に示す。水平

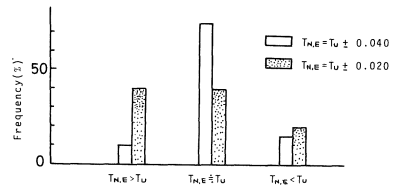


図5 T_{N-E} と T_U との相関関係

成分の平均値が $T_U \pm 0.040$ すなわち、 $T_{N-E} = T_U \pm 0.040$ の範囲に分布する確率は75%にも達する。 $T_{N-E} > T_U + 0.040$ については10%、 $T_{N-E} < T_U - 0.040$ は15%となっている。これをもう少し精度を上げ、 $T_{N-E} = T_U \pm 0.020$ の範囲にすると、この範囲内に分布する確率は40%、 $T_{N-E} > T_U + 0.020$ についても40%、 $T_{N-E} < T_U - 0.020$ は20%となり、精度を ± 0.040 としたときの $T_{N-E} = T_U$ に分布していたものは、その精度を ± 0.020 に上げることによって、そのほとんどは $T_{N-E} > T_U$ の部分に移行していることを示している。即ち、この地盤での卓越周期は、水平成分と上下成分が ± 0.040 秒の範囲内ではほぼ一致していると言えよう。

C) 沖積地盤(1m～10.0m)

図6にこの地盤上で得られた微動のパワースペクトルの形態を示す。このスペクトルの水平成分については、

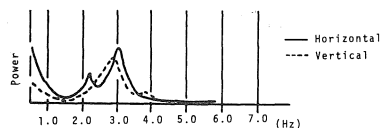


図6 沖積地盤(0m～10.0m)上のパワースペクトル

2.3Hzと3.0Hz付近にピークを持ち、洪積地盤のスペクトルに比べ、2.3Hz付近のピークの出現がこの地盤の特徴といえよう。2.3Hzと3.0Hz付近のピークのレベル差は後者の方が大きい測定地点が多い。上下成分については、そのピークは2.8Hz付近に存在し、洪積地盤とほぼピークは一致する。スペクトルの形態からこの地盤の振動特性を判断すれば、洪積地盤に比べ水平成分と上下成分のピークがずれ、水平成分に2つのピークを持つようになった。図7に卓越周期の分布状態を示す。図7(a)

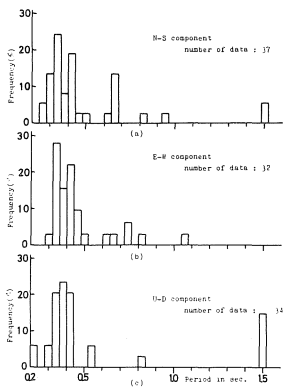


図7 沖積地盤(0m-10.0m)上における卓越周期の頻度分布

にNS成分の卓越周期の分布を示す。分布確率の最も大きい帯域は、0.321～0.360秒の帯域でその値は24%である。図7(b)に示されているEW成分についてもNS成分と同様、0.321～0.360秒の帯域に分布する確率が大きく28%である。しかし図7(c)に示されているUD成分については、洪積地盤と同様に最も分布する確率の大きいのは、0.361～0.400秒の帯域で23%の値を持つが、この帯域の両隣りの0.321～0.361秒と0.401～0.400秒に分布する確率も21%となり、これら三者がほぼ同じ確率で0.321～0.440秒の帯域に分布している。

図8に示した水平2成分の卓越周期の平均値分布は、

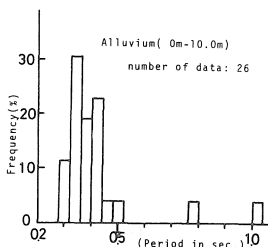


図8 沖積地盤(0m-10.0m)上における平均卓越周期の頻度分布

0.321～0.360秒の帯域に入る確率が大きく31%の値を持つ。

次に、 T_{N-E} と T_U との相関を図9に示す。 $T_{N-E} = T_U$

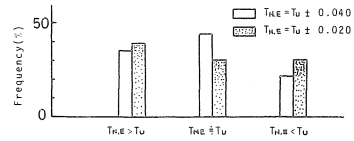


図9 T_{N-E} と T_U との相関関係

± 0.040 の範囲に分布する確率は43%、 $T_{N-E} > T_U + 0.040$ の範囲に分布する確率は35%、 $T_{N-E} < T_U - 0.040$ においては22%となり、その値の順序は洪積地盤と一致しているが、三者ともほぼ同じレベルで分布している。精度を上げ、 $T_{N-E} = T_U \pm 0.020$ の範囲にすると、この範囲内に分布する確率は30%、 $T_{N-E} > T_U + 0.020$ は39%、 $T_{N-E} < T_U - 0.020$ は31%となる。精度を ± 0.040 としたときの $T_{N-E} = T_U$ に分布していたものは精度を上げることによってほぼ同じ程度に $T_{N-E} > T_U$ と $T_{N-E} < T_U$ の部分に移行している。これは洪積地盤では見られなかった事実である。

d) 沖積地盤(10.1m～20.0m)

図10にこの地盤上で得られた微動のパワースペクトルの形態を示す。このスペクトルの水平成分については、

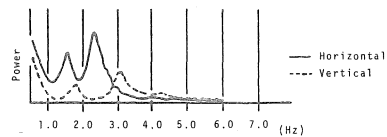


図10 沖積地盤(10.1m-20.0m)上のパワースペクトル

1.6Hzと2.3Hz付近にピークを持ち前記の沖積地盤に比べピークが全体に低周波の方へ移行し、1.6Hzと2.3Hz付近のピークレベルは後者の方が約2倍程度となっている。また上下成分については、1.8Hzと3.1Hz付近にピークを持ち、水平と上下成分のピークが完全にずれている。すなわち、地盤構造がより複雑になるに従いその波動構成も複雑になり、水平と上下成分のピークが分離して行く傾向にあると思われる。図11に各々の成分の卓越周期の分布状態を示す。図11(a)のNS成分の卓越周期分布において、最も分布確率の大きい帯域は、0.401～0.440秒の帯域でその値は27%である。また0.601～0.640秒に分布する確率も10%程度できている。図11

(b)のEW成分についてもNS成分と同様に最も分布確率の大きいのは、0.401～0.440秒の帯域で33%、0.601～0.640秒については17%となっている。図11(c)のUD成分については、0.321～0.360秒の帯域で分布確率が36%と最も大きく、次に、0.401～0.440秒

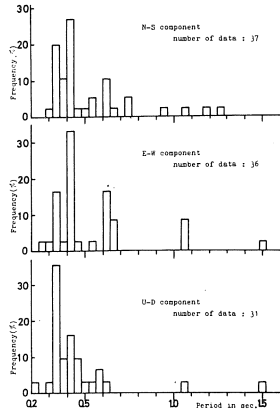


図11 沖積地盤(10.1m—20.0m)上における卓越周期の頻度分布

の帯域で16%となる。すなわち、水平2成分の分布確率の最も大きい帯域は、0.401～0.440秒であるが、上下成分は0.321～0.360秒と完全に分離している。

図12に示した水平2成分の卓越周期の平均値の分布は

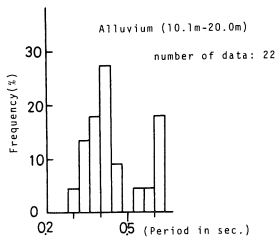


図12 沖積地盤(10.1m—20.0m)上における平均卓越周期の頻度分布

0.401～0.440秒の帯域の分布確率が28%と最も大きく、次に、0.361～0.400秒と0.601～0.640秒の2つの帯域となっておりその大きさは18%である。前述した洪積、沖積地盤の特性と異なるところは、0.321～0.440秒の帯域の中で各々の分布確率のピークが変動していることもさることながら、この地盤で初めて0.601～0.640秒の帯域の卓越周期の出現が見られたことである。

次に、 T_{N-E} と T_U との相関を図13に示す。 $T_{N-E} = T_U$

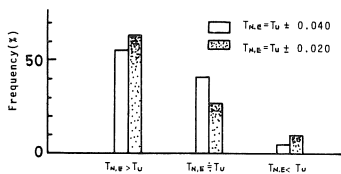


図13 T_{N-E} と T_U との相関関係

± 0.040 に分布する確率は41%、 $T_{N-E} > T_U + 0.040$ に分布する確率は55%、 $T_{N-E} < T_U - 0.040$ に分布する確率は4%となり、その分布確率の順序は前述の2つの地

盤とは異なり、 $T_{N-E} > T_U$ 、 $T_{N-E} \cong T_U$ 、 $T_{N-U} < T_U$ の順である。また精度を上げて、 $T_{N-E} = T_U \pm 0.020$ の範囲にすれば、この分布確率は27%、 $T_{N-E} > T_U + 0.020$ については64%、 $T_{N-E} < T_U - 0.020$ は9%となる。精度を上げることにより、 $T_{N-E} > T_U$ へ移行する数の方が $T_{N-E} < T_U$ へ移行する数よりもはるかに多いことを示している。すなわち、この地盤での水平成分の卓越周期は上下成分の卓越周期よりも長くなっている傾向にあると言える。

d) 沖積地盤(20.1m以上)

図14にこの地盤上で得られた微動のパワースペクトルの形態を示す。このスペクトルの水平成分については、

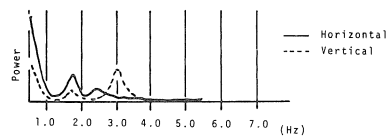


図14 沖積地盤(20.1m以上)上のパワースペクトル

前述した沖積地盤(11.1m～20.0m)のスペクトルと同様に1.6Hzと2.2Hz付近にピークを持つがそのピークレベルは相対的に小さい。1.6Hzと2.2Hz付近のピークを比べた場合、1.6Hz付近のピークレベルの方がやや大きいと思われる。また上下成分については、3.0Hz付近にピークを持つ。水平と上下成分の分離現象はますます明らかとなって行くようである。しかし、沖積層厚45m以上になるとこの現象はなくなり、水平と上下成分とも同じ周波数の所にピークの卓越が見られる。図15に各々の成分の卓越周期の分布状態を示す。図15(a)のNS

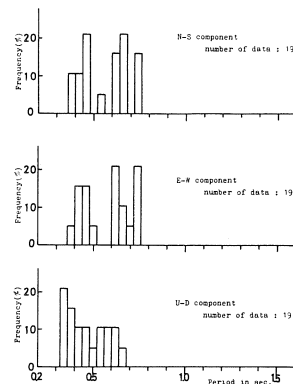


図15 沖積地盤(20.1m以上)上における卓越周期の頻度分布

成分の卓越周期分布において、分布確率の大きい帯域は、0.441～0.480秒と0.641～0.680秒の2ヶ所の帯域に存在し、その値は21%である。また、0.601～0.640秒、

0.721～0.760秒の帯域については、その値は16%となっている。EW成分については、分布確率の最も大きい帯域は、0.601～0.640秒と0.721～0.760秒でその値は21%である。UD成分については、0.321～0.360秒の帯域の分布確率が21%と最も大きく、次に0.361～0.400秒の帯域で16%となっている。すなわち、水平成分と上下成分の分布確率の最も大きい帯域は完全に分離している。この現象は沖積地盤で見られたが、より明確に分離しているようである。

図16に水平2成分の卓越周期の平均値を示す。この平

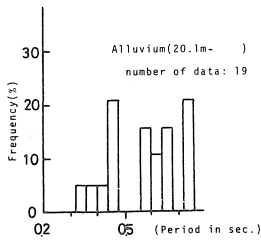


図16 沖積地盤(20.1m以上)上における平均卓越周期の頻度分布

均値の分布は0.441～0.480秒と0.721～0.760秒の2つの帯域において分布確率の最大値を持ち、その値は21%である。前述した沖積地盤に比べて、分布確率の大きい帯域は二つとも長周期帯域へ移行している。

次に、 T_{N-E} と T_U との相関を図17に示す。図に示すよ

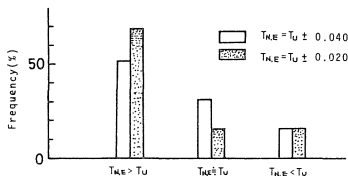


図17 T_{N-E} と T_U との相関関係

うに、 $T_{N-E} = T_U \pm 0.040$ に分布する確率は32%、 $T_{N-E} > T_U + 0.040$ については53%、 $T_{N-E} < T_U - 0.040$ については15%となり、その分布確率の順序は、前述の沖積地盤(10.1m～20.0m)と同じである。しかし、精度を上げ $T_{N-E} = T_U \pm 0.020$ の範囲にすると、この分布確率は16%、 $T_{N-E} > T_U + 0.020$ は69%、 $T_{N-E} < T_U - 0.020$ は15%となり、精度を上げることにより、 $T_{N-E} > T_U$ の範囲へ全て移行する。

以上述べたことを総括すれば、図18に示されているようにパワースペクトルのピークは、地盤構造の変化にともなって、水平方向は鋭敏に変動するが、上下方向はあまり変動しない。その結果、水平成分と上下成分のピークが徐々に分離現象を起し、沖積層厚10.1m以上の地盤において完全に分離している。

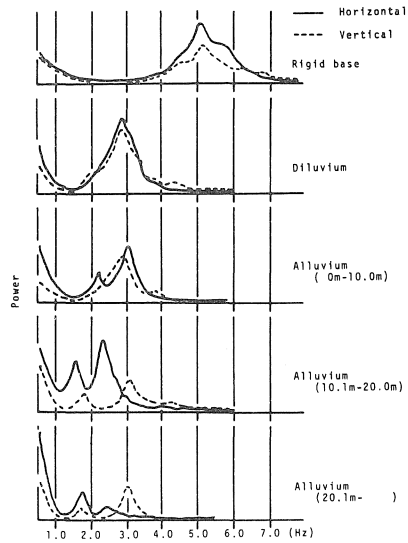


図18 地盤構造の変化にともなうパワースペクトルの変動

波動構成から見た水平成分の卓越周期の平均値は、図19に示されているように、洪積地盤から沖積地盤(0m

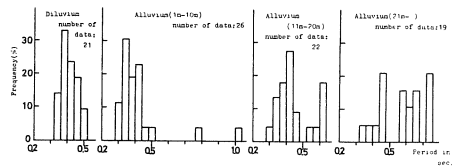


図19 地盤構造の変化に対する卓越周期の変動(水平成分)

～10.0m)に変わるところで僅かではあるが小さくなっている。また、図20に示した上下成分についても沖積地

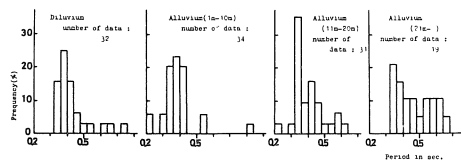


図20 地盤構造の変化に対する卓越周期の変動(上下成分)

盤(0m～10.0m)から沖積地盤(10.1m～20.0m)に変わるところで水平成分同様僅かではあるが卓越周期が小さくなっている。

図21に示した水平成分の卓越周期と上下成分の卓越周期との相関は、沖積層厚が増すにつれ、水平と上下成分の卓越周期が分離し、かつ、水平成分の卓越周期は上下成分の卓越周期より大きくなって行くことが明確になった。

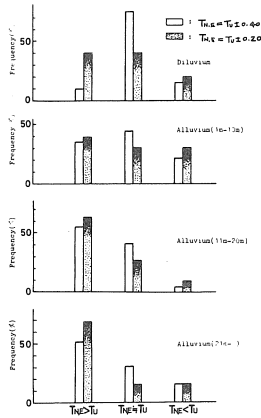


図21 地盤構造の変化に対する $T_{N,E}$ と T_U の関係

3. 新しい地盤種別判定法の提案

地盤構造の変化にともなう振動特性の変化は、水平成分の卓越周期と上下成分の卓越周期の分離現象として把握できた。すなわち、沖積層厚が増大すると水平成分の卓越周期はそれにともない長くなるが、上下成分の卓越周期は水平成分に比べてその変化速度が遅く、水平成分の間で卓越周期のずれが見られる事実である。この事実を利用し、新たなる地盤種別判定法を提案するものである。

図22に新地盤種別判定法を示す。横軸に水平2成分の

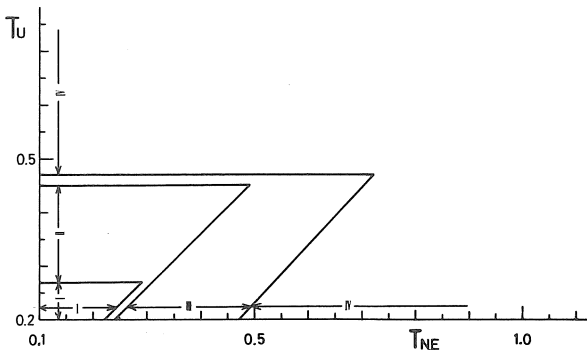


図22 地盤種別判定法

の卓越周期の平均値をとり、縦軸に上下成分の卓越周期をとる。第Ⅰ種地盤は、 $T_{N,E}$ の0.22秒から横軸に45°の角度を持って直線を引き、 T_U の0.27秒から横軸に平行に直線を引く、これらの直線と横軸及び縦軸に囲まれたゾーンを第Ⅰ種地盤とした。また、第Ⅱ種地盤は第Ⅰ種地盤と同様に、 $T_{N,E}$ が0.24秒、 T_U が0.45秒の点より直線を引き、第Ⅰ種ゾーンを除いたゾーンを第Ⅱ種地盤とした。同様に第Ⅲ種地盤は、 $T_{N,E}$ の値が0.47秒、 T_U が0.47秒である。第Ⅵ種地盤については、これら以外のゾーンを第Ⅵ種地盤とする。ここで用いた記号Ⅰ～Ⅳは金井による種別記号と地質分類上まったく同一の

ものであり、建築基準法によって分類されたものである。ここで地盤種別Ⅰ～Ⅳを述べると次のようになる。

- Ⅰ：岩石、固い砂質礫層などからなる地盤。
- Ⅱ：洪積層、5m程度の礫質沖積層からなる地盤。
- Ⅲ：5m以上の沖積層からなる地盤
- Ⅵ：30m以上の沖積層、埋立地などからなる地盤。

図23に濃尾平野において測定された微動の水平及び上下成分の卓越周期と新種別判定法を示す。この図におい

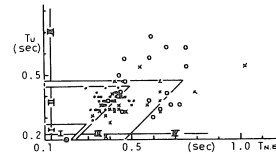


図23 新地盤種別判定法による種別判定

て、それぞれの区分に分布する分布確率は次のようになる。

表1 地盤の分布確率

区分Ⅰの中に●印が入る確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅰの中にある●印の数}}{\text{全体の●印の数}} \right) \times 100$	は80%
区分Ⅰの中で●印である確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅰの中にある●印の数}}{\text{区分Ⅰの中の全ての印の数}} \right) \times 100$	は63%
区分Ⅱの中に×印が入る確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅱの中にある×印の数}}{\text{全体の×印の数}} \right) \times 100$	は62%
区分Ⅱの中で×印である確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅱの中にある×印の数}}{\text{区分Ⅱの中の全ての印の数}} \right) \times 100$	は74%
区分Ⅲの中に○印が入る確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅲの中にある○印の数}}{\text{全体の○印の数}} \right) \times 100$	は68%
区分Ⅲの中で○印が入る確率	$\left(\frac{\text{区分Ⅲの中にある○印の数}}{\text{区分Ⅲの中の全ての印の数}} \right) \times 100$	は63%

以上のことよりこの判定法によれば、少なくとも60%以上の確率で各区分に対応する地盤がプロットされることになる。

4. まとめ

地盤構造別に振動特性を調べた結果、水平方向は地盤構造とともに鋭敏に変化するが、上下成分はあまり変化しなく、その結果水平成分と上下成分の間で卓越周期のずれが見られる。また、地盤構造の変化にともなってその波動構成も複雑になっていく。沖積層厚の増大とともに水平成分の卓越周期は大きくなるが、上下成分は僅かではあるが小さくなることがわかった。

新地盤種別判定法については、地盤構造との対応性もよく、その相関値は60%以上となっている。

終りにのぞみ、測定、解析に協力していただいたわれわれの研究室の学生諸君に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 飯田汲事：名古屋市における既往の地震とその災害，名古屋市防災会議（1974）
- 2) K. Kanai, T. Tanaka and K. Osada :
Measurement of the Microtremor. II. B. E.
R. I. , 35, p109 (1957)
- 3) K. Kanai, T. Tanaka : On Microtremors VIII. B.
E. R. I. , 39, p97 (1961)
- 4) 野越，五十嵐：微動の伝播性，地震 2 Vol. 23,
p264 (1970a)
- 5) Allam and Shima : An Investigation into the
Nature of Microtremors, B. E. R. I. , 45,
p43 (1967)
- 6) 谷口仁士：未発表資料
- 7) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士：常時微動測定に
よる名古屋地盤の振動特性と震害について，愛
工大研報，No.12B, p127 (1977)
- 8) 金井清：地震工学，共立出版（1964）