

宮崎市における常時微動特性に及ぼす地盤条件の影響

亀井 健史¹⁾・中村 真貴²⁾・原田 隆典¹⁾

Effect of Ground Condition on Microtremor Characteristics in Miyazaki City

Takeshi KAMEI, Masaki NAKAMURA, Takanori HARADA

Abstract

Observations were made of microtremors at 20 sites widely distributed in Miyazaki city to investigate the dynamic properties of surface soil layers. The microtremor measurements were carried out using a servo type pick. The relationship between the ground conditions and dynamic properties of surface soil layers in Miyazaki city was investigated quantitatively, based on the results of the microtremor observation. The predominant periods of the ground depend on the strength characteristics of surface soil layers. To this end microtremor measurements are recommended to gain a better understanding of earthquake damage and evaluation of the ground. The method is relatively quick and inexpensive.

Keywords: Microtremor, H/V spectral ratio, Predominant period, Ground condition

1. はじめに

地震動に影響を与える要因としては、震源特性、伝播特性、ローカルサイト特性の3つがあることはよく知られている。特にその地点の地盤構造に起因するローカルサイト特性は、地盤の増幅特性として評価され、耐震工学の観点からも重要なものであり、構造物を建てる前に把握する必要がある。そして、このローカルサイト特性を把握する方法としては、その地点に地震計を設置し観測された地震動を解析する方法や、標準貫入試験やPS検層などといったボーリング調査結果に基づいて地盤構造を把握し、推定された地盤構造からその地点の地震動のローカルサイト特性を推定する方法などがある。しかしながら、地震計の観測値は基本的にその地震計の周囲の揺れに強さを表しているに過ぎず、そこから少し離れた地点では地盤条件の影響によって異なる震動特性を表わす。また、ボーリング調査を行えば地盤に関する大まかな情報が入手できるが、あくまでも点的な情報であり、実際には面的な情報が必要となる。そこで簡便に地盤の震動特性が推定できる常時微動を用いた研究が、これまでに数多く行われている¹⁾²⁾。

常時微動の研究が活発化し、実用化されたのは1950年代以降からである。多くの理論的または観測記録に基づいた経験的な研究の蓄積はあるが、現在でも常時微動と地盤や地震動との関係は解決されていない。

Kanaiら³⁾は、常時微動から地盤の増幅特性を評価し、

1) 土木環境工学科教授

2) 資源環境科学専攻大学院生

周期1秒程度以下の短周期微動と地盤構造の関係から、常時微動より地盤を4つの地盤に大別する方法を提案している。また、中村ら⁴⁾⁵⁾は、常時微動が主に実体波によって構成されているという概念から、常時微動のH/Vスペクトル比(水平成分と上下成分のスペクトル比)を計算することで表面波の影響を取り除くことができるとしている。このことから彼らは、表層地盤のS波増幅特性が近似的に推定できることを示した。この点について、時松ら⁶⁾は微動の主たる成分は表面波であるとして、H/Vスペクトル比をレイリー波の基本モードと比較し、そこから地盤の一次固有周期と対応していることを理論的に検証した。大町⁷⁾らはさらに常時微動と表面波との関係を明らかにし、多層地盤の周期特性推定法を提案した。

一方、若松ら⁸⁾は常時微動のH/Vスペクトル比に着目して、その基本的な性質や工学的利用に関する適用範囲に関して検討している。そして制約条件はあるが、常時微動のH/Vスペクトル比が地盤震動特性の把握や地震動推定の評価に常時微動のH/Vスペクトル比が有効であるとしている。また大熊ら⁹⁾は、宮崎県内の強震計の観測記録とその地点の常時微動を比較・検討し、2つのH/Vスペクトル比がよく似た形状を示し、その特性を用いた地震動推定法を提案した。これまで微動の研究の多くは日本で行われ、発展しているが、1985年のメキシコ地震や1989年のロマ・プリータ地震(アメリカ・サンフランシスコ)における表層の地盤構造の地震動に与える影響の重要性が国際的に認知されて以降、微動に関する研究は国際的に増加している。しかし、常時微動の波動主成分が実体波であるか、

表面波であるのかについては検討の余地がある。

常時微動を利用する上はまだ多くの研究が必要と考えられるが、H/V スペクトル比がその地点の地盤情報を得ることができることは既往の研究から明らかである。また、単点で計測することが可能であり、長時間の計測が必要となるアレー観測などより簡単な計測で利用できる利点がある。上記のような点に着目して本研究では、宮崎市内の常時微動計測記録から地盤条件を推定するために、地盤条件が常時微動特性にどのような影響を与えるかを、宮崎市内の 20 地点のボーリングデータ^{10),11)}とその地点の常時微動の計測記録を用いて検討している。

2. 常時微動計測および解析方法

2.1 常時微動の計測地点と計測方法

宮崎市は日向灘に注ぐ大淀川やツ瀬川を中心とした海岸線に南北に展開する宮崎平野（沖積平野）にあり、沖積層の厚さは 20m~30m 程度が中心で、最大でも 50m~60m である。この沖積層が宮崎層群（新第三紀層）上に堆積している¹⁰⁾。常時微動の計測地点として、図-1 に示す宮崎平野の宮崎市中心部（○）と青島地区（◇）20 地点を選定し（図-2、3）、常時微動の計測を行った。

文献^{10),11)}より得られた基盤（N=50 以上）までの層厚が明らかとなっている、3384 本のボーリング調査のデータをもとに計測地点を選定し、常時微動計測を実施した。地点名は、文献¹¹⁾の地図番号と地点番号を示す。例えば、地点 50-001 は、地図番号 50 の地点番号 001 のボーリングデータとなっている。

表-1 は、図-2~3 に示した計測地点のボーリングデータより得られた地点ごとの堆積層の層厚と、主な堆積層の土層構成を示している。そして、常時微動の計測地点を層厚 10m 毎に A~G の 7 つのグループに分類した。グループ A は岩盤とみなせる層（N=50 以上）が地表面である地点であり、それ以降のグループ B~G は、それぞれの堆積層の層厚が 10m 程度ずつである地点となる。

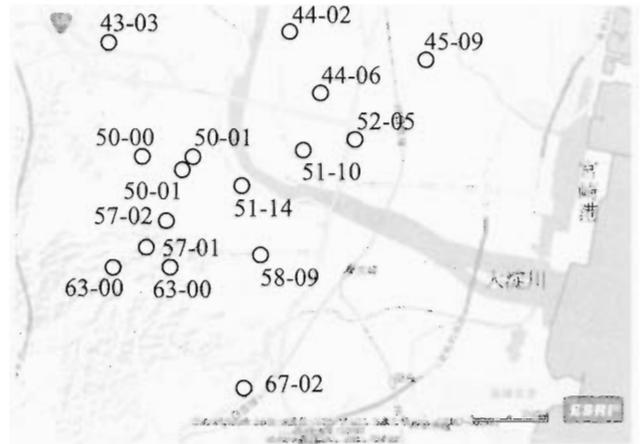


図-2 宮崎市中心部の常時微動計測地点。

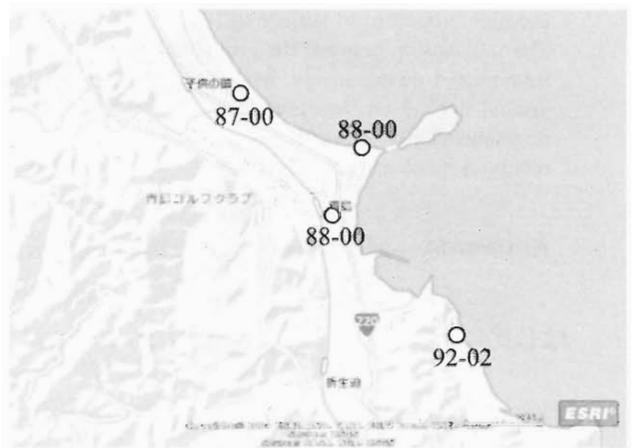


図-3 青島地区の常時微動計測地点。

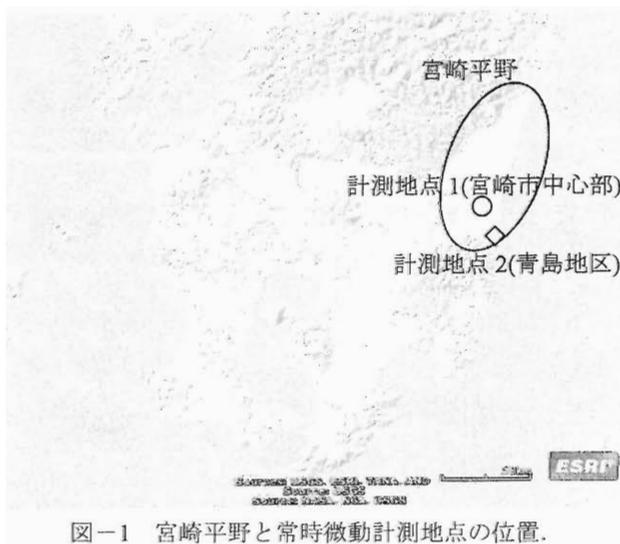


図-1 宮崎平野と常時微動計測地点の位置。

表-1 常時微動計測地点のボーリングデータ^{10),11)}。

計測地点 (地図番号-地点番号)	層厚 (m)	堆積層の 土層構成	グループ
50-001	0	—	A
57-028	0	—	
51-141	10	砂	B
63-001	12	粘土	
63-002	13	粘土	
67-027	6	砂	
87-003	9	砂	
92-025	5	砂	C
50-018	22	シルト	
57-014	20	シルト	
88-003	21	砂	D
43-032	26	シルト	
51-107	26	シルト	
58-090	27	シルト	
88-006	31	砂	E
50-019	38	シルト	
44-028	45	シルト	F
44-062	49	シルト	
45-094	62	砂	G
52-056	56	シルト	

本研究の常時微動計測は、微動計としてサーボ型速度計を用いて行い、図-4に示す微動計で得られた速度波形をコンピュータに記録する。今回の計測では、40.96秒の速度波形3成分（水平がNS成分とEW成分の2成分、上下1成分）を5回計測した。計測の時間間隔が0.01秒なので、40.96秒の計測を行うと、計測一回当たりのデータの総数が4096個となり、FFT（高速フーリエ変換）解析の条件であるデータ総数 2^n 個を満たすことができる¹²⁾。図-5は計測された常時微動の速度波形の一例を示している。

振動源のすぐそばで計測を行うと、常時微動が振動源から地盤内を伝播せずに、微動計に入射してしまうため、地盤の震動特性を正確に得ることができない。したがって、計測の場合は車の通行に注意する必要があり、深夜など交通量が少ない時間帯に計測したり、解析する場合には交通振動などが入った波形は使用しないほうがよい。また、5波を計測する理由は、その平均をとることで、例えば1波に交通振動などが入っていても、その影響を抑えることができ、より安定した結果を得ることができると考えられるからである。さらに、交通振動などが大きすぎて、その波形を解析する上で使うことができないとしても、残りの計測波形を使って解析ができる。



図-4 常時微動の計測機器と計測風景。

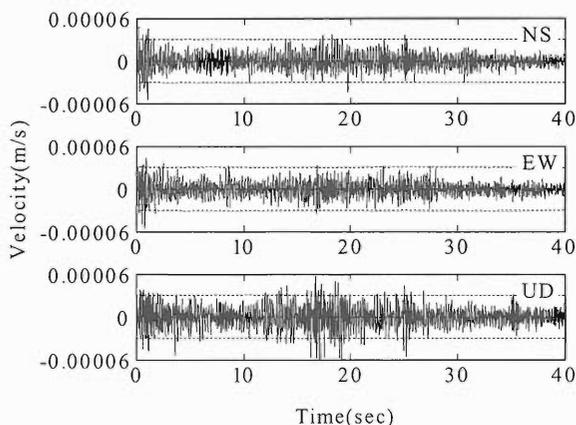


図-5 計測された常時微動速度波形の一例。

2.2 解析方法

計測した常時微動波形は、3成分（水平2成分と上下1成分）それぞれについて波形ごとにフーリエスペクトルを求め、バンド幅0.4HzのParzen Window¹²⁾により平滑化処理を行った後に、水平2成分のフーリエスペクトルの二乗平方根を計算し、それと上下成分フーリエスペクトルの比をとり、式(1)よりH/Vスペクトル比を算出する。

$$H/V = \frac{\sqrt{H_{NS}^2 + H_{EW}^2}}{V} \quad (1)$$

ここで、H/Vは常時微動のH/Vスペクトル比、 H_{NS} はNS成分のフーリエスペクトル、 H_{EW} はEW成分のフーリエスペクトル、Vは上下成分のフーリエスペクトルである。そして、式(1)より求めた5つの常時微動H/Vスペクトル比の平均をとり、それをその地点の常時微動H/Vスペクトル比とする。

式(1)より常時微動H/Vスペクトル比と同様の方法で、地震動のH/Vスペクトル比を算出すると、常時微動のH/Vスペクトル比と非常によく似た形状を示すことが、既往の研究によりわかっている^{4)~9)}。常時微動の波動成分については、実体波であるとする考えと表面波であるとする考えの2つがあることは前述したが、仮に常時微動の主成分が実体波とした場合は、地震動の主要動も実体波であることから、常時微動と地震動のH/Vスペクトル比の形状が似ていることも理解しやすい^{4)~9)}。また、常時微動が表面波である場合は、レイリー波基本モードのH/Vスペクトル比の卓越周期とS波卓越周期がほぼ等しいことから、地震動と常時微動のH/Vスペクトル比の形状が似ているものと考えられる^{6)~7)}。

3. 常時微動H/Vスペクトル比の結果

ここでは、宮崎市内20地点（図-2、3参照）で計測された常時微動速度波形から、式(1)より算出されたH/Vスペクトル比を示す。H/Vスペクトル比の値が最も大きくなる周期が、その常時微動波形が最も多く含んでいる周期となり、その時の周期を卓越周期と呼ぶ。常時微動H/Vスペクトル比の一般的な周期特性として、岩盤のような硬質地盤では、H/Vスペクトル比の形状がフラットで卓越周期が見えにくく卓越周期の値も小さい。逆に、厚い堆積層をもつ軟弱地盤では、H/Vスペクトル比の卓越周期が顕著に見え、また卓越周期も長周期になる傾向がある。

図-6は、常時微動計測地点（図-2、3参照）で得られた速度波形から算出した、それぞれの地点の常時微動H/Vスペクトル比を、基盤までの層厚のグループ毎（表-1）に分類したものを示す。グループA、Bでは、地点によってスペクトル比の形状にばらつきが大きく安定していない。しかし、グループC~Gは、卓越周期が顕著に

出て、またスペクトル比の形状も安定している。これはグループ A、B が基盤 (N=50 以上) の影響を大きく受け、グループ C~G が基盤の上に堆積している層の影響を受けているためと考えられる。そして、基盤までの層厚が大きくなるにつれ、H/V スペクトル比の卓越周期も長周期になり、スペクトル比の形状が安定する。

また、グループ A の 57-028 やグループ B の 87-003 は、周期 0.2 秒付近で常時微動のスペクトル比の値が大きくなる。57-028 は盛土された地点であり、87-003 は護岸整備された河川の側であったため、常時微動がその影響を受け、水平成分のある一定の周期のみが卓越して計測されたものと考えられる。

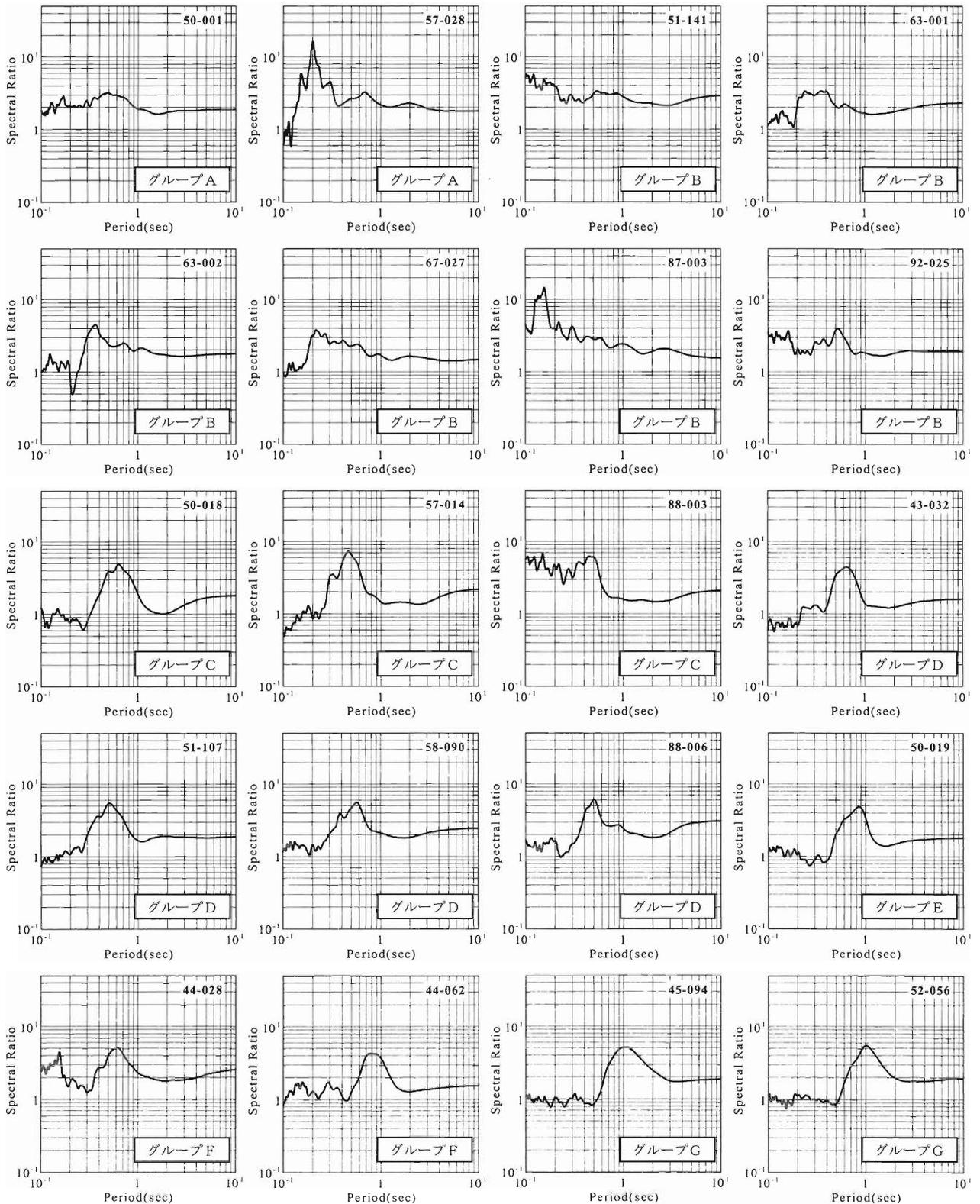


図-6 基盤 (N=50 以上) までの層厚分類毎の常時微動から得られた H/V スペクトル比。

4. 常時微動と地盤条件

4.1 基盤までの層厚と常時微動 H/V スペクトルとの卓越周期の関係

常時微動計測地点のボーリングデータから求めた各計測地点の基盤までの層厚と、常時微動 H/V スペクトル比 (図-6) から得られた卓越周期の関係を表-2 と図-7 に示す。ただし、地点 50-001 と 57-028 は地表面が岩盤であり、堆積層 0m となる。そして、図-7 ではこの2点のデータは除いている。図-7 の丸 (●) は基盤までの層厚が 10m 以下の地点 (グループ B)、三角 (▼) は 11m~20m までの地点 (グループ C)、四角 (■) は 21m~30m (グループ D)、三角 (▲) は 31m~40m (グループ E)、星型 (★) は 41m~50m (グループ F)、菱形 (◆) は 51m~60m までの地点 (グループ G) であることを示している。

表-2、図-7 より、基盤までの層厚が厚くなると、常時微動 H/V スペクトル比の卓越周期は長周期となる。基盤までの層厚と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期との関係は、高い正の相関 ($R^2=0.88$) をもっている。基盤までの層厚と卓越周期の近似直線として、式(2) が求められる。

$$H = 55.1T_M - 1.86 \quad (2)$$

ここで、 H は基盤までの層厚、 T_M は常時微動 H/V スペクトル比より得られた卓越周期を示している。

表-2 各地点の基盤までの層厚 H と卓越周期 T_M の関係。

計測地点 (地図番号-地点番号)	層厚 H (m)	卓越周期 T_M (sec)
50-001	0	0.10
57-028	0	0.20
51-141	10	0.10
63-001	12	0.30
63-002	13	0.35
67-027	6	0.20
87-003	9	0.15
92-025	5	0.10
50-018	22	0.63
57-014	20	0.45
88-003	21	0.45
43-032	26	0.65
51-107	26	0.50
58-090	27	0.55
88-006	31	0.50
50-019	38	0.85
44-028	45	0.60
44-062	49	0.80
45-094	62	1.10
52-056	56	1.00

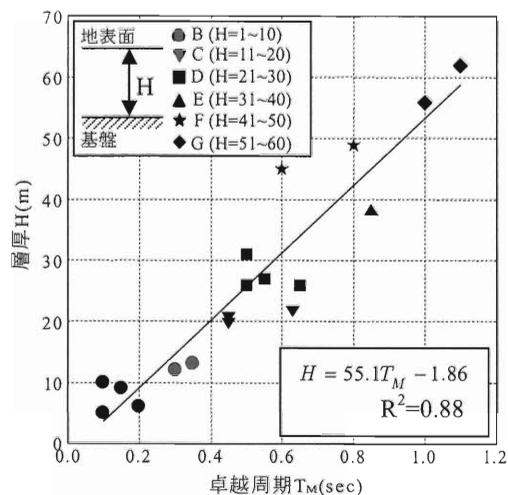


図-7 層厚 H と卓越周期 T_M の関係。

基盤までの層厚と地震動から得られた卓越周期が、一次比例の関係にあることは、既往の研究から明らかであるが (例えば¹³⁾、常時微動から得られた卓越周期においても、同様の関係があることを、図-7 は示唆している。

4.2 地盤の固有周期と常時微動 H/V スペクトルとの卓越周期の関係

道路橋示方書¹⁴⁾では、式(3) (四分の一の波長則) から算出される地盤の特性値 (地盤の固有周期) をもとに表-3 のような地盤種別の分類を行う。式(3)は、地盤の固有周期は地層の厚さと地層の S 波速度 (せん断波速度) によって決めることを示唆している。地盤種別の目安としては、I 種地盤は地盤の固有周期が 0.2 秒未満であり、岩盤などの固い地盤となる。そして、III 種地盤は地盤の固有周期が 0.6 秒以上であり、沖積地盤のうち軟弱地盤などの軟らかい地盤となり、II 種地盤は I 種地盤と III 種地盤のどちらにも属さない洪積地盤や沖積地盤となっている。ただし、式(3)は、波動論に基づく水平成層地盤モデルでの理論式¹³⁾であり、常時微動において式(3)を適用するには、常時微動の波動の主成分が実体波である必要がある。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (3)$$

$$\text{粘性土層の場合 } V_{si} = 100N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 25) \quad (4)$$

$$\text{砂質土層の場合 } V_{si} = 80N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \quad (5)$$

ここで、 T_G は地盤の固有周期(sec)を、 H_i は i 番目の地層の厚さ(m)、 V_{si} は i 番目の地層の平均 S 波速度(m/s)を、 N_i は標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値を表す。

表-3 耐震設計上の地盤種別 (文献¹⁴⁾)

地盤種別	地盤の特性地 T_G (sec)
I 種	$T_G < 0.2$
II 種	$0.2 \leq T_G < 0.6$
III 種	$0.6 \leq T_G$

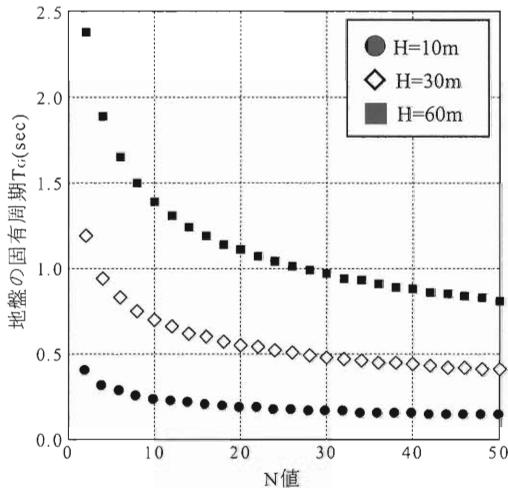


図-8 地盤の固有周期 T_G と N 値の関係 (砂質土層)。

N 値に対して、式(3)から得られる地盤の固有周期がどのような関係になるかを図-8に示す。この図は、層厚が10mと30mと60mの1層の砂質土層の N 値が2から50まで2ずつ変化するときの、地盤の固有周期をプロットしている。砂質土層であるので、 S 波速度は式(5)より算出している。 N 値が小さい場合は、 N 値が大きの場合に比べ、層厚 H が10mと60mでの地盤の固有周期の差が大きくなる。これは、 N 値が小さい場合には、層厚が地盤の固有周期に大きな影響を与え、 N 値が大きの場合には、層厚の影響が小さくなることを示唆している。

次に、各常時微動計測地点における、式(3)より算出された地盤の固有周期、その固有周期から求めた地盤種別(表-3参照)、さらに、その地点の常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期を表-4に示す。図中のI種地盤は、岩盤であるグループAと、浅い堆積層のグループBで堆積層の土層構成が砂の地点51-141、67-027、87-003、92-025となる。また、グループBで堆積層の土層構成が粘土の地点63-001、63-002と、グループCで堆積層の土層構成が砂の地点88-003が、II種地盤と分類される。さらに、I種地盤とII種地盤以外の地点がIII種地盤となっている。

地盤の固有周期とその時の地盤種別と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期の関係を図-9に示す。既往の研究(例えば⁹⁾と同様に、地盤の固有周期と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期とは、非常に高い相関 ($R^2=0.93$) を示している。また、50-001と57-028を除くI種地盤を示す4地点は、式(3)より算出した地盤の固有周期と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期とがほぼ一致している。このことから、常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期からI種地盤であることが推定できる。また、II種地盤とIII種地盤との厳密な分類を、常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期から推定することは困難であるといえる。しかし、このII種、III種の分類には工学的に大きな意味はなく、地盤震動特性の把握が工学的には重要である。図-9より常時微

表-4 各地点の地盤の固有周期 T_G と地盤種別と常時微動 H/V スペクトル比の卓越周期 T_M の関係。

地点 (地図番号-地点番号)	固有周期 T_G (sec)	地盤種別	卓越周期 T_M (sec)
50-001	—	I種	0.10
57-028	—	I種	0.20
51-141	0.20	I種	0.10
63-001	0.33	II種	0.30
63-002	0.50	II種	0.35
67-027	0.18	I種	0.20
87-003	0.17	I種	0.15
92-025	0.09	I種	0.10
50-018	0.68	III種	0.63
57-014	0.56	III種	0.45
88-003	0.46	II種	0.45
43-032	0.76	III種	0.65
51-107	0.68	III種	0.50
58-090	0.56	III種	0.55
88-006	0.58	III種	0.50
50-019	1.11	III種	0.85
44-028	1.05	III種	0.60
44-062	1.04	III種	0.80
45-094	1.32	III種	1.10
52-056	1.19	III種	1.00

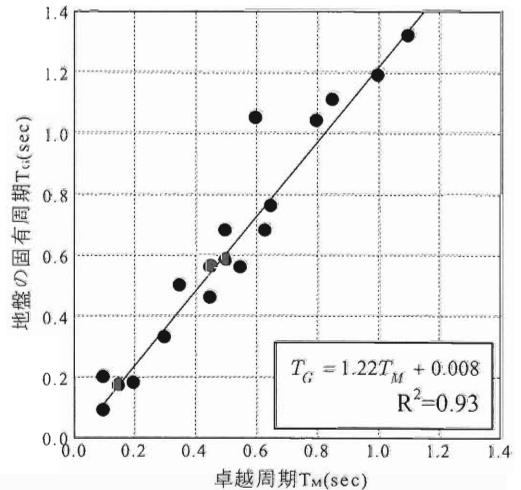


図-9 地盤の固有周期 T_G と卓越周期 T_M の関係。

動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期が地盤の震動特性を示していると考えられることから、大まかな地盤種別を行うことは可能であろう。

4.3 常時微動と S 波速度の関係

一般的な標準貫入試験では、 S 波速度を求めることは行っていないが、日本各地で行われておりデータ数は非常に多く、入手も容易である。そのことから N 値と S 波速度の関係については多くの研究がなされている(例えば¹⁵⁾。しかし、 N 値は地盤の動的特性を表す指標で

はなく、厳密な地盤の動的特性を得るには、正確に S 波速度を求める必要がある。

図-9 において、地盤の固有周期と常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期が一致していることを示した。そこで、常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期とボーリングデータから求めた基盤までの層厚を用いて、式(3)より地盤の S 波速度を算出し、その算出した S 波速度と常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期との関係を図-10 に示す。なお、図-10 の地盤種別分類は表-4 のものであり、丸(●)は I 種地盤、菱形(◇)は II 種地盤、四角(■)は III 種地盤となる。また、図-11 は表層が 1 層の水平成層地盤モデルに対する、表層地盤の S 波速度と周期の関係を表している。S 波速度は、表層の層厚 5~60m までの 7 ケースを計算した。

地震工学分野では、工学基盤(N=50)の S 波速度は、一般的に 300~500m/s と考えられることから、図-11 の S 波速度は 400m/s までを求めた。今回の常時微動計測地点は、基盤までの層厚が 5m~62m の地点である(表-1 参照)。図-10 に示した S 波速度の値は、図-11 の H=5m~H=60m の曲線の中にある。そして、常時微動 H/V スペクトル比から求めた卓越周期と S 波速度の関係から、近似直線として以下の式(6)~(8)が得られる。

I 種地盤では、

$$V_S^1 = 1745.5T_M + 480 \quad (6)$$

II 種地盤では、

$$V_S^2 = 206.8T_M + 89.25 \quad (7)$$

III 種地盤では、

$$V_S^3 = 22.57T_M + 193.7 \quad (8)$$

となる。ここで、 V_S は S 波速度、 T_M は常時微動から得られた卓越周期を表す。図-10 では、I 種地盤を表す周期 0.2 秒以下の S 波速度は、周期ごとの S 波速度に大きなばらつきがあり、III 種地盤を表す周期 0.6 秒以上の S 波速度は、周期が変化しても S 波速度に大きなばらつきはない。この特性を考慮し、地盤種別毎に式(6)~(8)の 3 つの近似直線を、地盤の S 波速度と常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期の関係を示す近似直線として提案する。式(6)~(8)より、常時微動から S 波速度を求め、さらに求めた S 波速度と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期を用いて、式(3)から基盤までの層厚の推定を試みた。推定した層厚 H' とボーリングデータに基づいた基盤までの層厚 H の関係を図-12 に示す。図-12 より、層厚は精度よく推定されている。しかし、ボーリングデータから求めた基盤までの層厚と推定した層厚との誤差が大きいもの

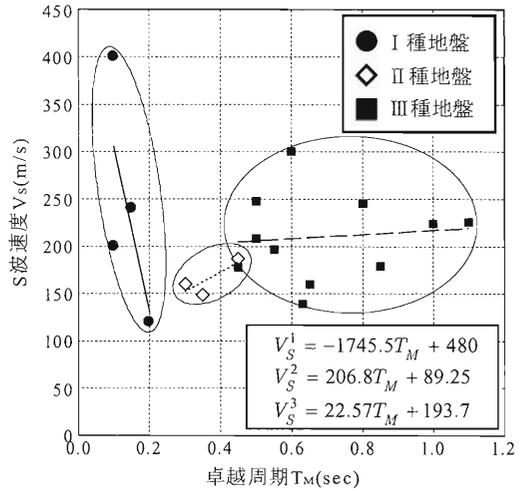


図-10 S 波速度 V_S と卓越周期 T_M の関係。

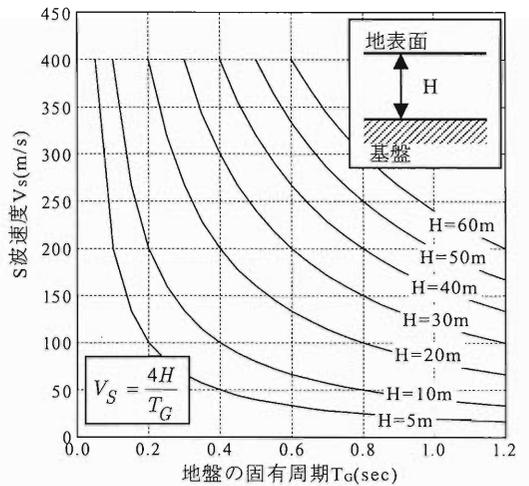


図-11 S 波速度 V_S と地盤の固有周期 T_G の関係。

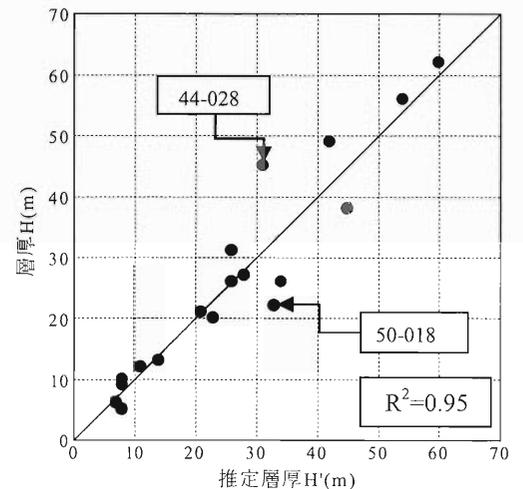


図-12 基盤までの層厚 H と推定層厚 H' の比較。

として、地点 44-028 と 50-018 (図-2 参照) がある。この 2 点は III 種地盤に分類され、図-10 に示した S 波速度の近似直線との誤差が大きいためと考えられる。

5. まとめ

常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期とボーリングデータを比較・検討することで、以下に示す項目について明らかにした。

- 1) 基盤までの層厚と常時微動の H/V スペクトル比から得られた卓越周期とは高い相関がある。これより、常時微動計測を行うことで、その地点の大まかな堆積層の層厚を推定できる可能性を示した。
- 2) 地盤の固有周期と N 値の関係を示し、また地盤の固有周期と常時微動 H/V スペクトル比から得られた卓越周期が、非常によく似た周期特性を持つことを明確にした。
- 3) 地盤の S 波速度と常時微動の H/V スペクトル比から得られる卓越周期との関係を示し、その関係から S 波速度を求め、層厚の推定法を提案した。

参考文献

- 1) 堀家正則：微動の研究について，地震，第2輯，第46巻，343-350，1993.
- 2) 物理探査学会：物理探査ハンドブック手法編，193-225，1998.
- 3) K. Kanai, and T. Tanaka: On Microtremors VIII, Bulletin of the Earthquake Research Institute, the Univ. of Tokyo, vol.39, No.1, 97-114, 1961.
- 4) 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の試み，第7回日本地震工学シンポジウム，256-270，1986.
- 5) 中村豊：常時微動に基づく地震動特性の推定，鉄道総研報告，vol.2，18-27，1988.
- 6) 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，81-87，1992.
- 7) 大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄巧：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，土木学会論文集，No.489/I-27，251-260，1994.
- 8) 若松邦夫，安井譲：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第471号，61-70，1995.
- 9) 大熊裕輝，松岡昌志，山崎文雄，原田隆典：宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定，土木学会論文集，No.696/II-58，261-272，2002.
- 10) 宮崎市：宮崎市地盤図（改訂版）解説編資料編（I），宮崎市，1998.
- 11) 宮崎市：宮崎市地盤図（改訂版）資料編（II），宮崎市，1998.
- 12) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
- 13) 大原資生：最新耐震工学第3版，森北出版，1988.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2002.
- 15) T. Kamei, J. Otani, and Y. Nakamura: Comparison of Elastic Wave Velocities Using Downhole and Suspension Techniques. , J. Geotech. Eng. , No.481/III-25, 187-198, 1993.