

宮崎市青島地区における常時微動計測による工学的基盤深度の推定とその評価

Estimation of Engineering Bedrock at Aoshima Area
in the Miyazaki City Based on Microtremor Characteristics and Its Evaluation.

亀井 健史 (宮崎大学工学部社会環境システム工学科)
中村 真貴 (宮崎大学工学部社会環境システム工学科)
吉田 太輝 (宮崎大学大学院工学研究科土木環境工学専攻)

地盤の常時微動計測結果は、簡便性、短時間、かつ安価という観点から地盤や構造物の振動特性の評価や地震防災対策によく用いられる。本研究では宮崎市青島地区において常時微動を計測し、水平成分と上下成分のフーリエ振幅スペクトル比 (H/V スペクトル比) から得られる卓越周期と、工学的基盤 (N 値 ≥ 50) 深度との関係を明らかにしている。また、亀井・中村によって提案されている基盤深度推定式を用いて工学的基盤深度を推定することにより新たに基盤断面図を作成し、その信頼性を宮崎市が公表しているボーリングデータに基づいた基盤断面図と比較検討した。その結果、両者は極めて良い対応性を示唆した。常時微動計測は地盤調査結果等がまったくない地域においても軟弱層厚や工学的基盤深度を推定でき、地盤調査の第1次近似として有効な手法であり、工学的な観点から有意な手法であることを実証した。

キーワード：常時微動，H/V スペクトル比，卓越周期，工学的基盤 (IGC : D07)

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)では、地震動により多くの木造家屋、土木構造物が甚大な被害を受け、「震災の帯」といわれる被害集中領域が形成された。日本は地震大国であり、兵庫県南部地震を契機として地震活動期に入ったとも言われており、2011年3月11日には東北地方太平洋沖地震が発生し、今後も近い将来に、首都直下型地震や東南海地震が発生すると予想されている¹⁾。また、日本の大都市や都市部は、ほぼ例外なく平野部に存在している。日本の平野は沖積平野であり、場所によっては地下深くまで沖積層が堆積している場合もある。沖積平野は一般的に軟弱地盤が多く、地震発生時には大きな被害が発生することは容易に推定できる。さらに、地震動は工学的基盤深度(沖積層厚)が深くなるにつれて増幅し、家屋や構造物に与える影響が大きくなる²⁾。このため都市部や平野部における地震被害を抑制するためには、工学的基盤深度を把握しておくことは地盤防災上極めて重要である。

工学的基盤深度は、一般的に構造物を建設する際に調査される。多くの場合ボーリング試験が行われるが、この試験方法は正確な調査結果が得られるものの、時間や費用を費やすため効率的な試験方法とはいえない。近年では、常時微動に関する研究が数多く行われ、常時微動と工学的基盤深度の関係についての研究も行われている。

常時微動に関する研究は、1950年代頃から活発に行われ多くの理論的・経験的な研究の蓄積^{3,4)}がある。時松・宮寺⁵⁾は、レイリー波基本モードと観測した微動H/Vスペ

クトル比を比較すると、よく一致することから、短周期微動にはレイリー波が卓越しており、微動の主たる成分を表面波であるとしている。中村・上野⁶⁾は、基盤と地表面のそれぞれのH/Vスペクトル比の比をとり、この比が基盤と地表面での増幅特性であるとし、これはSH波による重複反射の影響が主体的として、微動の主たる成分を実体波であるとしている。その微動に含まれている成分は、表面波であるか、実体波であるかは、はっきりと解明されていないが、常時微動がその地盤特性を表していることはこれまでの既往の研究例^{3,4)}から明らかである。一方、構造物の高層化に伴って、周期1秒以上の長周期微動を対象とした研究例が数多く行われている。微動のアレー観測結果より、F-K法⁷⁾や空間自己相関法^{8,9)}といったレイリー波の分散推定手法により深さ数km程度の深部の地下構造探査などが実施されている。

また、高井ら¹⁰⁾は、微動H/Vスペクトル比は、ノイズの有無、時間および月変化による影響を受けにくく、スペクトルの形状は安定している。しかし、地盤の乾湿状態によってH/Vスペクトル比に影響が現れるため、測定前の降水量等に注意が必要であること確認している。齋田、中村¹¹⁾は、ほぼ同じ地点において常時微動を計測した場合は、長い年月をおいても、ほぼ安定した計測結果を得られることを明らかにした。

常時微動H/Vスペクトル比は、1986年に中村・上野⁶⁾によって提案され、これを用いて多くの研究がされてきた。大熊ら¹²⁾は、常時微動と地震動のH/Vスペクトル比のピーク周期を比較すると、1対1の直線状にほぼ分布してい

るため、常時微動 H/V スペクトル比から地震動の周期特性を把握することが可能であることを示した。ほかに、常時微動 H/V スペクトル比の形状やピーク周期を、地盤の 1 次固有周期や、地震動の形状、卓越周期と比較し、非常によく似た性質を示すことが明らかとなっている(例えば 13)、14)。これらのことより、常時微動 H/V スペクトル比から、直接、地盤の震動特性を把握することが可能である。

亀井、中村¹⁵⁾は、宮崎市内 74 地点の常時微動計測結果から地盤の卓越周期を求め、ボーリングデータより得られた工学的基盤 (N 値 ≥ 50) の深度が強い相関関係にあることを明らかにした。また彼らは、この工学的基盤深度推定式に基づいた工学的基盤の断面図を作成し、その推定断面図の信頼性を宮崎市が公表しているボーリングデータに基づいた工学的基盤断面図¹⁶⁾との比較から、精度よく工学的基盤深度を推定できることを明らかにしている。

本論文では、宮崎市青島地区において亀井・中村¹⁵⁾の追加検討として、新たに常時微動計測を実施し、彼らが提案したによる卓越周期に基づいた基盤深度推定式¹⁵⁾の他の地域への適用性を検討している。まず、青島地区において常時微動計測を 14 地点で行い、その計測結果から H/V スペクトル比 (水平/上下スペクトル比) を算出し、地盤の卓越周期を求めた。また、この卓越周期とボーリングデータから得られた工学的基盤 (N 値 ≥ 50) 深度の関係を解明した。さらに、亀井・中村による卓越周期に基づいた基盤深度推定式¹⁵⁾を用いて同地域の工学的基盤深度を推定し、得られた結果に基づいた推定基盤断面図を作成し、その結果と宮崎市が公表している実際の基盤断面図¹⁶⁾と比較し、上記提案式の信頼性を検討している。

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

宮崎市青島地区は、図-1 に示すように宮崎平野に位置する。宮崎平野の基盤は第三紀の堆積層からなる宮崎層群である。具体的には砂岩泥岩の互層で、日南海岸の青島などにみる鬼の洗濯板がそれである¹⁷⁾。その上に沖積層が構成され、宮崎平野が形成されている。青島地区のほとんどは、宮崎層群と日向層群の岩盤が地表面付近に存在している。また、沖積層が堆積している場所は、沖積層の層厚が平均 7~8m 程度と比較的浅く、最も深い場所でも 30m 程度である。

常時微動の計測地点としては、図-2 に示す宮崎市青島地区を選択した。また、宮崎市地盤図¹⁶⁾より工学的基盤が明らかとなっている海外線沿い周辺と、山地付近を中心に 14 地点を選定した。計測地点番号は宮崎市地盤図¹⁶⁾に示されたボーリングデータの地点番号に合わせて、同文献内で使用されている地図番号と地点番号によって示す。

本研究で用いた常時微動計測器は、ムービングコイル型速度計である。微動計で得られた速度波形をアンプによ



図-1 宮崎平野と常時微動計測の位置

この地図は国土地理院白地図を使用したものである。

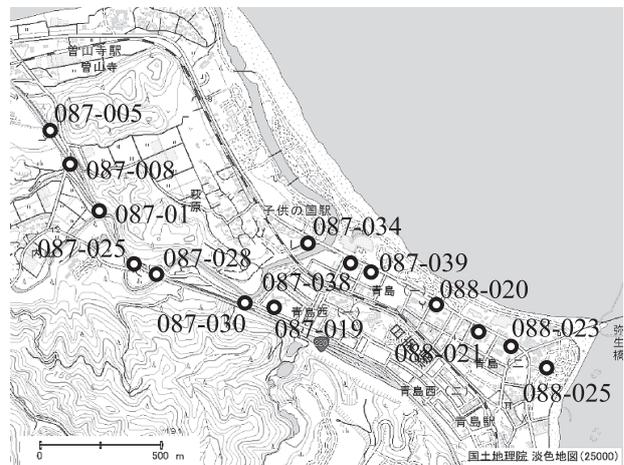


図-2 青島地区における常時微動計測地点

この地図は国土地理院淡色地図を使用したものである。



図-3 常時微動計測機器と計測風景

て処理し、コンピュータにデータを記録する(図-3)。本計測では、水平 2 成分 (NS, EW) と鉛直 1 成分 (UD) の、計 3 成分を計測時間 40.96 秒の 1/100 秒間隔で 10 回計測した。そのうち安定して得られた波形 5 波を選択して用いる。

2.2 解析方法

本研究では、各計測地点において、常時微動を 10 回計

測し、このうち、安定して計測されたと思われる計測波形 5 波を選択し用いることとした。水平 2 成分と鉛直 1 成分の 3 成分それぞれについて FFT (高速フーリエ変換)¹⁸⁾により、フーリエスペクトルを求めた。FFT には文献 19) に掲載されているプログラムを使用した。その後、バンド幅 0.4Hz の Parzen Window¹⁹⁾によって平滑化処理を行い、その平滑化処理をしたスペクトルから 5 波の平均スペクトルを算出した。そして、その平均スペクトルを式(1)によって、水平 2 成分のスペクトル二乗和平方根を鉛直成分で除し、H/V スペクトル比を求めた。

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

ここで、H/V は常時微動 H/V スペクトル比を NS, EW, UD は各成分の平均スペクトルを表す。

2.3 常時微動 H/V スペクトル比と地盤構造

宮崎市青島地区において計測した常時微動速度波形と式(1)から H/V スペクトル比を算出した。既往の研究^{3),4)}により H/V スペクトル比の卓越周期は地盤の固有周期と判断することができる。常時微動 H/V スペクトル比から得られる卓越周期の一般的な特性として、岩盤のような硬質地盤が表層に露出している地盤では、H/V スペクトル比の形状はフラットであり、卓越周期は明瞭に表れず、短周期が卓越する傾向にある。これに対し、軟弱地盤が厚く堆積している地点では、スペクトル形状は山なりの大きな起伏を持ち、卓越周期が明瞭に表れ、長周期が卓越する傾向にある。例として、本研究で計測した地点 087-019 と、087-008 のボーリングデータと H/V スペクトル比と、亀井、中村¹⁵⁾の用いた計測結果例 31-009 を図-4 に示す。087-019 や 087-008 では H/V スペクトル比の卓越周期は不明瞭だが、31-009 では卓越周期が判断しやすい。図中の□印は卓越周期を読み取ったピーク位置を表す。図-4 に示すように、工学的基盤深度の違いによって H/V スペクトル比の形状が異なり、卓越周期に差が現れることがわかる。このことは、卓越周期によって工学的基盤深度を推定できる可能性を示唆している。

2.4 S 波速度の検討

亀井・中村の基盤深度推定式¹⁵⁾は、常時微動計測から得られる卓越周期のみを用いた推定式であり、表層地盤の S 波速度を考慮せずに工学的基盤深度の推定を行っている。後述する図-9、図-10 に示す推定した工学的基盤深度と実際の工学的基盤深度との誤差の原因の 1 つに、計測地点における S 波速度を考慮していないことが挙げられる。そこで、青島地区における計測地点ごとの表層地盤の平均 S 波速度を表-1 に示す。S 波速度算出には、道路橋示方書²⁰⁾に示されている S 波速度推定式 (式(2)) を用いた。土

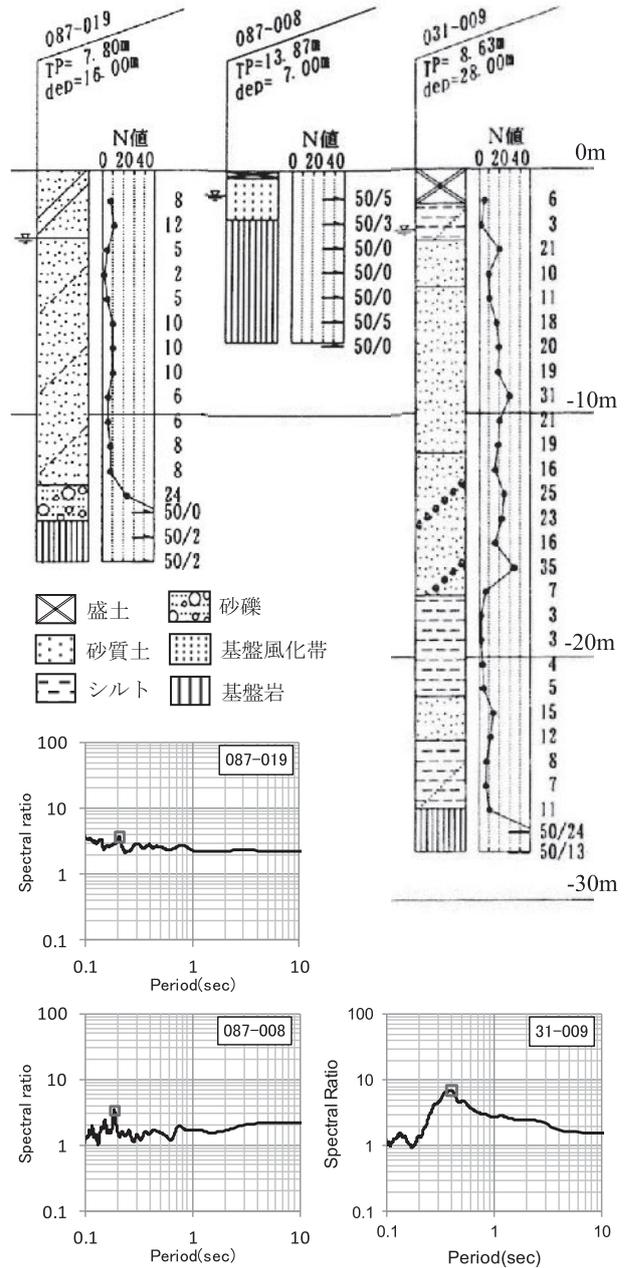


図-4 ボーリングデータ¹⁶⁾と常時微動計測結果から得られた H/V スペクトル比の一例

表-1 各計測地点における S 波速度

計測地点	S 波速度(m/s)	計測地点	S 波速度(m/s)
087-008	237	087-039	141
087-025	253	087-038	120
087-034	117	087-005	161
088-020	156	087-028	210
088-021	156	088-023	196
087-011	207	087-030	165
		087-019	164

層が砂質土層の場合は式(3)、粘性土層の場合は式(4)を用いた。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (2)$$

$$\text{砂質土: } V_{si} = 80N_i^{1/3} \quad (1 \leq N_i \leq 50) \quad (3)$$

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

ここで、 T_G は地盤の固有周期 (sec), 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), N_i は i 番目の地層の平均 N 値を示している。

表層地盤の S 波速度を一定と仮定したときの、式(2)に基づいた基盤深度と地盤の固有周期との関係を図-5 に示す。図より表層地盤の S 波速度の違いによって、たとえ同じ基盤深度であっても地盤の固有周期が、異なる値を示すことがわかる。式(2)に示した四分の一波長則に従うと地盤の固有周期は基盤深度と S 波速度のトレードオフの影響を受ける。そのため、微動の卓越周期のみを用いて工学的基盤深度を推定する場合、表層地盤の S 波速度を十分考慮する必要がある。また同図から、地盤が硬質になるにつれて基盤深度が地盤の固有周期に与える影響は小さくなり、基盤深度が深くなるにつれて、地盤の固有周期は大きく変化しないことが読み取れる。これとは逆に、地盤が軟弱になるほど、基盤深度が地盤の固有周期に与える影響が大きくなり、基盤深度によって卓越する周期帯が大きく異なることが読み取れる。すなわち、地盤が硬質か軟弱かによって、基盤深度と地盤の固有周期との関係が異なることがわかる。

3. 常時微動と工学的基盤深度の関係

本章では、工学的基盤深度と常時微動計測から得られた H/V スペクトル比の卓越周期との関係から工学的基盤深度の推定を行う。そして、宮崎市青島地区で工学的基盤の断面図を作成し、実際の基盤断面図と比較することで基盤断面を精度よく推定可能であるか検討を行う。前述したように宮崎平野は工学的基盤となる宮崎層群の上に沖積層が堆積している。この宮崎層群は深いところでは深度 2500m 程度まで分布しており、S 波速度は 600m/s 程度となる^{21),22)}。また、調査位置近郊の宮崎空港で実施された表面波探査および微動アレー探査²³⁾では、T.P.-10m 以深で S 波速度が 300m/s の層となっている。さらに、より深部の S 波速度構造として、 $V_s=4.0\text{km/s}$ の層が深さ 5~7km 程度まで分布していることが示されている^{24),25)}。

亀井、中村¹⁵⁾は、宮崎市中心部を中心に 74 地点で常時微動計測を行っており、工学的基盤深度 (N 値 ≥ 50) と常時微動計測より得られる卓越周期の関係を求めている。この関係を図-6 に示す。この図から、工学的基盤深度と卓越周期は $R^2=0.8$ 以上の高い相関を示していることがわかる。また、亀井、中村は常時微動計測から得られる卓越周期と工学的基盤深度の関係より、式(5)に示す工学的基盤深度推定の 1 次式を提案している¹⁵⁾。

$$H = 58.41T_M - 1.51 \quad (5)$$

ここで、 H は工学的基盤深度 (m), T_M は常時微動計測

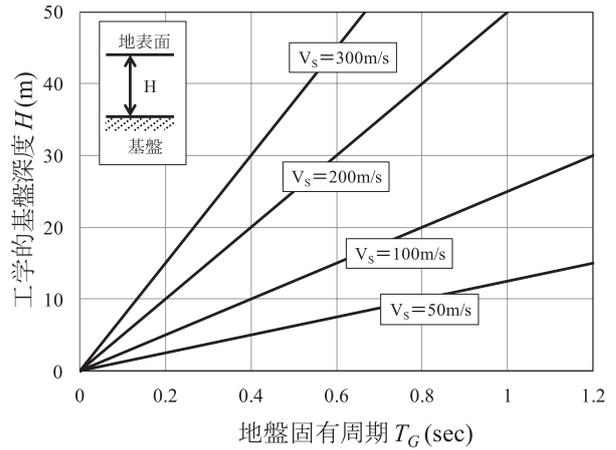


図-5 S 波速度の違いによる工学的基盤深度と地盤固有周期の関係

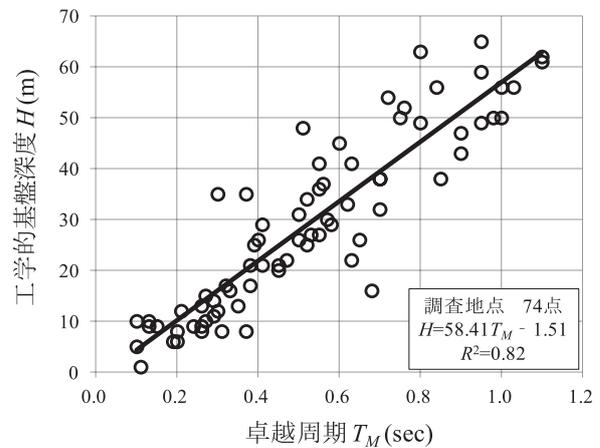


図-6 常時微動計測結果から得られる卓越周期と工学的基盤深度の関係¹⁵⁾

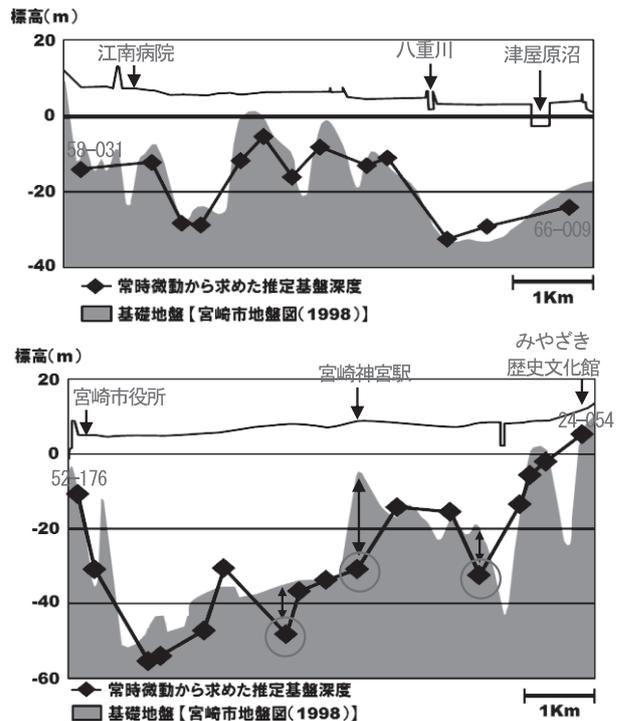


図-7 亀井、中村が推定した工学的基盤断面図と実際の工学的基盤断面図の比較¹⁵⁾

から得られる卓越周期 (sec) を示している。

彼らは、宮崎市内中心部において、式(5)から工学的基盤深度を推定し、断面図を作成することで、実際の基盤断面と比較し、精度よく基盤断面を推定することが可能であることを示している。彼らが推定した工学的基盤断面図を図-7 に示す。これより、推定した基盤断面図と実際の基盤断面図とが良い対応を示していることが確認できる。ただし、この推定式ではS波速度が地点ごとに大きく異なるという前提で基盤深度を算出していることになるため、基盤深度を正確に推定できない可能性がある。

式(5)を本研究の結果にも適用し、宮崎市青島地区における工学的基盤深度の推定を行った。これら計測地点ごとの工学的基盤深度、常時微動計測より得られた卓越周期、式(5)より推定した工学的基盤深度を表-2 に示す。計測地点の14地点のうち、地点088-025に関しては、N値のデータは無いが、近傍の他地点のボーリングデータにおいても、ほぼ例外なく基盤風化帯よりN値50以上を示してい

表-2 各測定地点におけるボーリングデータから得られた基盤深度、卓越周期、推定工学的基盤深度

地点番号	基盤深度 (m)	卓越周期 (sec)	推定基盤深度 (m)
087-008	2.0	0.10	4.4
087-025	3.0	0.11	4.9
087-034	3.9	0.16	7.7
088-020	3.9	0.11	5.0
088-021	5.2	0.19	9.8
087-011	5.9	0.13	6.0
087-039	6.8	0.11	4.9
087-038	6.9	0.11	4.6
087-005	7.5	0.17	8.7
087-028	9.5	0.19	9.4
088-023	10.0	0.18	9.0
087-030	11.7	0.23	11.6
087-019	14.4	0.21	10.5
088-025	28.0	0.55	30.9

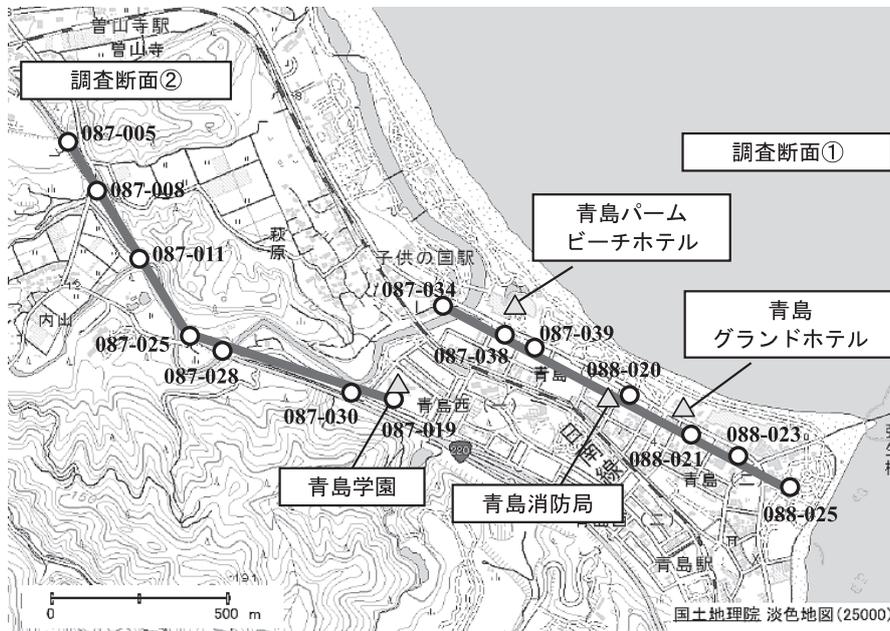


図-8 調査断面 (この地図は国土地理院淡色地図を使用したものである。)

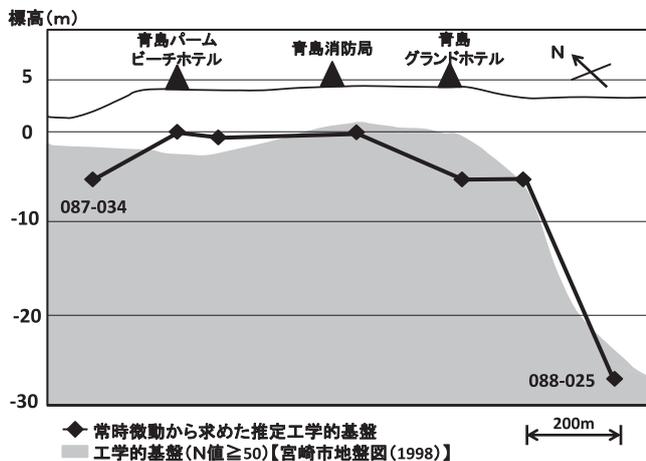


図-9 常時微動計測結果から求めた推定工学的基盤深度 (調査断面①)

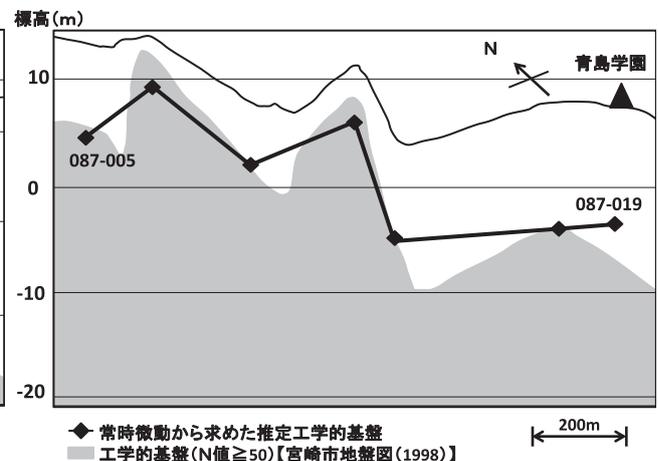


図-10 常時微動計測結果から求めた推定工学的基盤深度 (調査断面②)

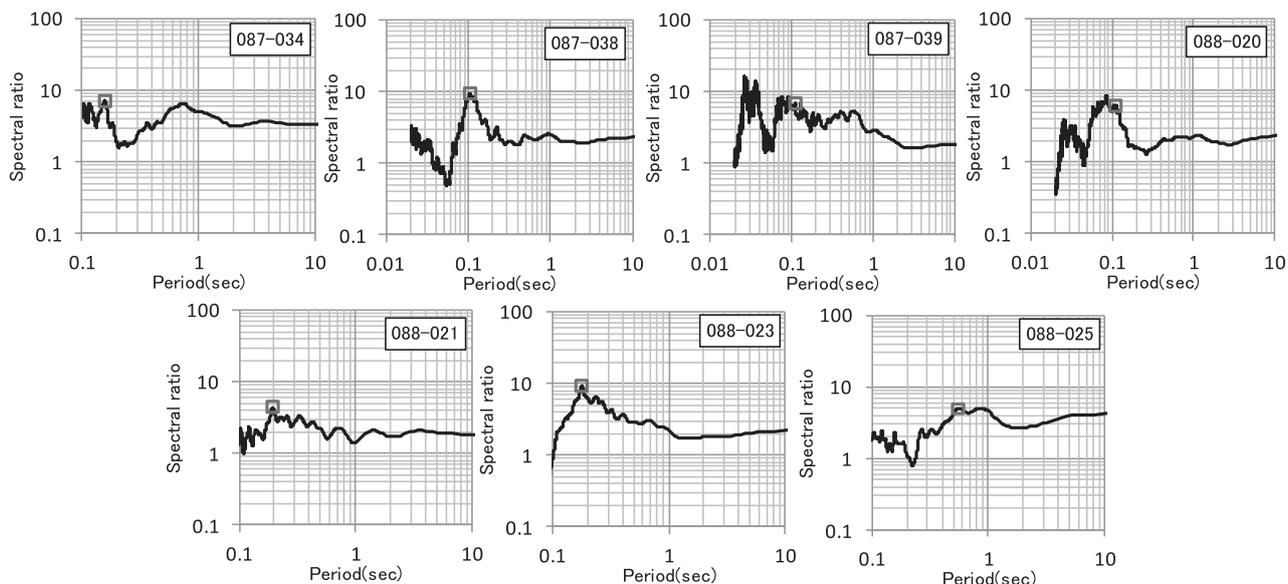


図-11 調査断面①における常時微動計測より得られた H/V スペクトル比

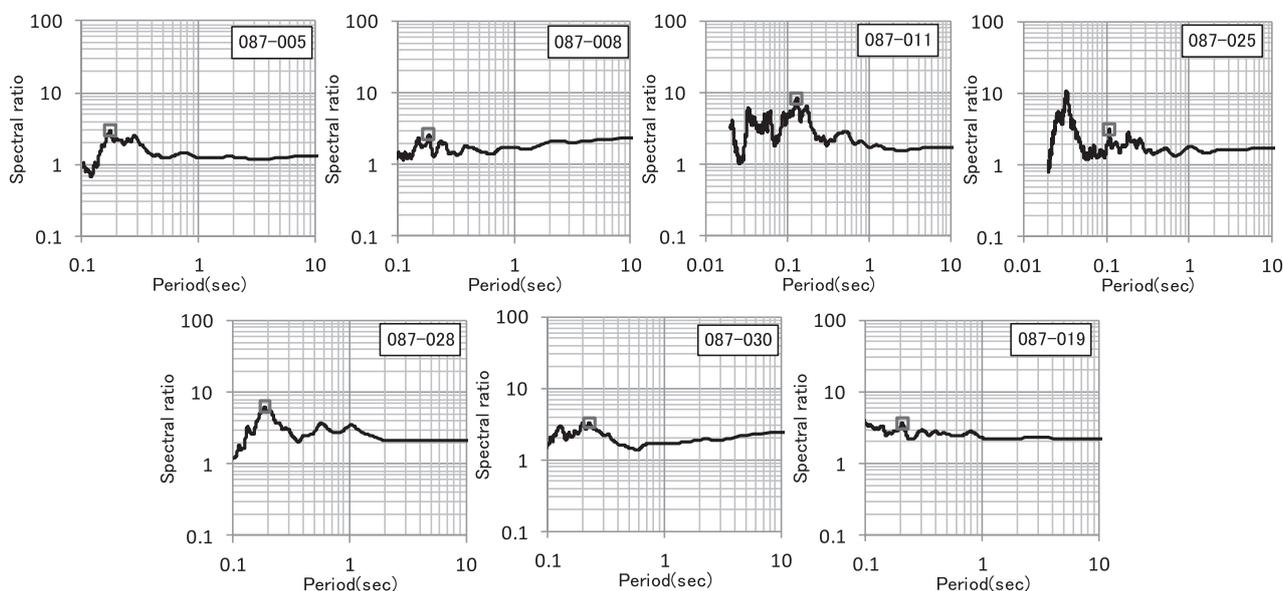


図-12 調査断面②における常時微動計測より得られた H/V スペクトル比

るので、この地点に関しても基盤風化帯より工学的基盤とした。

これより、表-2に示す推定した工学的基盤深度の結果から、宮崎市青島地区における工学的基盤の断面図を作成した。そして、この推定した工学的基盤断面図と、宮崎市が公表しているボーリングデータ¹⁶⁾から作成した工学的基盤の断面図との比較を行う。調査断面①は、県道377号線沿いに作成し、調査断面②は、国道220号線のバイパス道路に沿って断面図を作成した。調査断面①は海岸に近く、調査断面②は山地に近い地区である。断面図作成にあたっては、宮崎市が公表しているボーリングデータ¹⁶⁾より、基盤深度(N値 ≥ 50)を抜き出し、地点ごとの基盤深度をつなぎ基盤断面とした。そして、その上に、推定した工学的基盤深度を地点ごとにプロットし、各計測地点の推定基盤深度をつなぎ推定基盤断面とした。調査断面①の計

測地点における最深の基盤深度は約28.0mであり、その地点の基盤の標高値は約-24.0mとなる(図-9の工学的基盤参照)。調査断面②では、最深の基盤深度は約11.7mであり、その地点の基盤の標高値は約-3.3mである(図-10の工学的基盤参照)。この2つの調査断面を、常時微動計測結果を用いた。基盤深度断面図の作成例として示す。工学的基盤の標高値は、基盤深度からその地点の標高値を引いたものとする。調査断面①における常時微動計測結果(計測地点数:7地点)から推定した工学的基盤の標高値と、宮崎市が公表している地盤断面図から求めた工学的基盤の標高値の比較を図-9に示す。同様に調査断面②における比較を図-10に示す(計測地点数:7地点)。調査断面①、②のどちらにおいても誤差はあるが、基盤断面の概形を捉えていることが確認できる。また、調査断面①、②は、どちらも基盤深度が浅い地点が多い。常時微動 H/V スペ

クトル比の一般的な特徴として、基盤深度が浅く、硬質地盤が露出しているような地盤では、卓越周期が明瞭に確認されにくいことは前述したが、本研究においては、工学的基盤深度が比較的浅い地点であっても精度よく推定できていると思われる。図-11, 12 に本研究での常時微動計測より得られた H/V スペクトル比を示す。図中の□印は、各 H/V スペクトル比の卓越周期を読んだピーク位置を示している。087-034 には周期 0.8 秒付近、087-039, 087-028 には小さいが周期 0.5 秒や 1 秒付近といった長周期側にピークがある。087-039, 087-028 については長周期側のピーク値が小さく、近郊の他地点の H/V スペクトル比の結果より、短周期側のピーク値を卓越周期であると判断した。087-034 については上記 2 地点のように他地点との比較から短周期側のピークを読んでいるが、長周期側のピークも明確に出ている。これが深部の地盤構造に起因するものならば他地点の結果にも影響を与えると考えられるため、この 087-034 地点固有の要因であり、別途検討が必要である。

亀井・中村が計測を行った宮崎市中心部を中心とした地区と、本研究で計測を行った宮崎市青島地区の、両地区での卓越周期と工学的基盤深度の関係を図-13 に重ね合わせて示す。同図より、本研究で求めた青島地区における計測結果と、亀井、中村の計測結果を比較すると、本研究での卓越周期（横軸）の範囲は、彼らの卓越周期の範囲の半分ほどしかないが、両者は非常によい対応性を示しており、同様の傾向にあることが読み取れる。このことから、宮崎市街地を中心とした地区と、宮崎市青島地区の両地区において、工学的基盤深度の推定に、彼らの基盤深度式を適用することで、十分に信頼性の高い推定を行えることが確認された。よって、彼らの基盤深度式の妥当性が示されたと考えられる。ここで、彼の計測結果と本研究での計測結果とを合わせた、合計 88 計測地点における工学的基盤深度の推定式を式(6)に示す。

$$H = 58.65T_M - 1.73 \quad (6)$$

ここで、 H は工学的基盤深度 (m)、 T_M は常時微動計測から得られる卓越周期 (sec) を示している。

式(5)から卓越周期のみを用いて計測地点における、工学的基盤深度の推定を行い、この推定結果から図-9, 図-10 に示すように、工学的基盤断面図を精度よく推定可能であることを示した。しかしながら、精度よくこれらを推定することが可能なものの誤差はある。

この誤差の原因として、以下の 3 つが考えられる。第一に、常時微動の計測点数が挙げられる。式(5)に示した基盤深度式は、実際の計測に基づいた経験式であるため、ある程度の誤差は生じるものと考えられる。そのため、より多くの地点での計測データを集積することが、誤差を小さくするために必要となる。第二に、この基盤深度式は常時微動計測から得られる卓越周期のみを用いた推定式であ

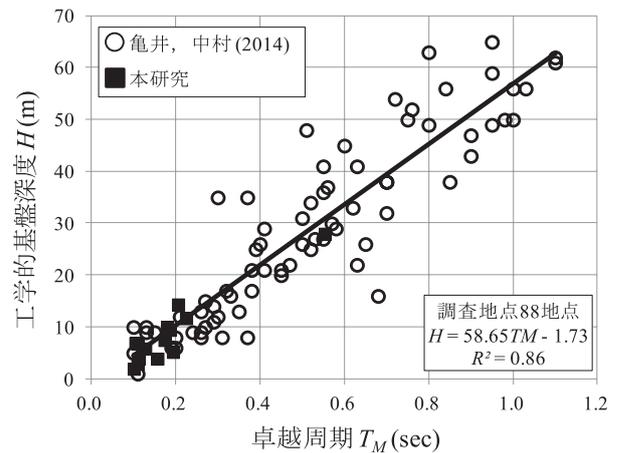


図-13 亀井、中村の結果¹⁵⁾と本研究の結果の比較

り、地盤材料や地盤種別、S波速度、各地層の層厚などを考慮せず推定していることがあげられる。本論文で示した計測地点のS波速度は120~240m/sと倍程度の違いがあり、亀井・中村が用いた計測地点のS波速度についても同様に100~250m/sと地点ごとにS波速度が大きく異なる¹⁵⁾。第三に、各地点によって表層地盤を構成する地盤材料が異なる。そのため、同じ基盤深度であっても、異なる周期特性を示す場合があると考えられ、このような原因によって誤差が生じるものと考えられる。しかしながら、亀井、中村は常時微動計測をボーリング調査における調査地点選定や、調査結果の第1次近似として位置付けている。また、広範囲に及んで工学的基盤深度を把握することを考えたとき、さまざまな地盤情報や地盤特性値を用いれば正確に推定することが可能であると思われるが、時間や費用を要する。この問題点は、常時微動計測を行うことで、簡単かつ安価で迅速に工学的基盤深度を把握することが可能であるため解消される。

本研究では、推定した工学的基盤深度と実際の工学的基盤深度の断面図を見る限りでは、地盤調査の第1次近似として、亀井・中村の基盤深度推定式は十分に有用性があると判断できた。すなわち、彼らの基盤深度式はボーリング調査が行われていない地点、地域において非常に有意性が高いと思われる。また、詳細な工学的基盤断面図を作成するためには、常時微動の計測地点の間隔を密にすることによって可能である。しかし、より高精度の地盤構造推定を行うためには、地点ごとのS波速度を一定と考える本手法では限界あり、アレー観測等により直接地盤構造を把握する方法を用いる必要がある。

4. まとめ

宮崎市青島地区を対象として常時微動計測を行い、これより得られる H/V スペクトル比の卓越周期と、工学的基盤深度の関係を検討した。以下に本研究により得られた主要な結論を列記する。

- (1) 宮崎市青島地区の常時微動計測から得られる H/V スペクトル比の卓越周期と、工学的基盤深度の関係を明らかにし、工学的基盤深度が深くなるにつれ卓越周期が長周期化することを確認した。
- (2) 亀井・中村の基盤深度推定式を用いて工学的基盤深度を求め、工学的基盤断面図を推定した結果と、宮崎市が公表しているボーリングデータから作成した実際の基盤断面図は非常良い対応性を示した。
- (3) 本研究で得られた工学的基盤深度の推定式と、亀井・中村の基盤深度式が、ほぼ同様の値を示していることや、宮崎市青島地区において、亀井・中村の基盤深度式を用いて、工学的基盤深度を精度よく推定できたことから、彼らの基盤深度推定式の信頼性を実証した。
- 11) 齋田淳, 中村豊: 常時微動を用いて推定した表層地盤の地震動特性と被害の関係-フィリピン・マニラ・イントラムロス地区でのパイロット調査結果-, 土木学会地震工学論文集, pp.1-4, 2003.
- 12) 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/I-58, pp.261-272, 2002.
- 13) 梅澤元樹, 倉田光春, Sanjay Pareek, 飯島俊樹: 微動と地震動の H/V スペクトルによる地盤振動特性推定に関する研究, 日本建築学会東北支部, 研究報告書, pp.455-58, 1999.
- 14) 亀井健史, 中村真貴, 原田隆典: 宮崎市における常時微動特性に及ぼす地盤条件の影響, 宮崎大学工学部紀要, 第40号 別冊, pp.167-174, 2011.
- 15) 亀井健史, 中村真貴: 宮崎平野における常時微動計測による地盤の動的特性と基盤深度の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.93-102, 2014. (掲載予定)

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部: 地震予測地図 ウェブサイト 全国版, <http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/index.html>, 2014年6月参照.
- 2) 大崎順彦: 地域と地震・地盤と地震, 建築雑誌, Vol.88, No.1067, pp.667-672, 1973.
- 3) 堀家正則: 微動の研究について, 地震, 第2輯, 第46巻, pp.343-350, 1993.
- 4) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック手法編, pp.193-225, 1998.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.256-270, 1986.
- 7) Matsushima, T. and Okada, H.: Determination of deep geological structure under urban areas using long-period microtremores, Buturi-Tansa, Vol.43, pp.21-33, 1990.
- 8) Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., University of Tokyo, Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 9) 岡田廣, 松島健, 森谷武男, 笹谷努: 広域・深層地盤物理探査のための長周期微動探査法, 物理探査, Vol.43, pp.402-417, 1990.
- 10) 高井俊先, 倉田光春, Sanjay Pareek, 梅澤元樹: 微動 H/V スペクトルによる微動の基礎的性質および地盤構造推定に関する研究-郡山市地域における常時微動定観測-, 日本建築学会東北支部, 研究報告書, pp.19-22, 2001.
- 16) 宮崎市: 宮崎市地盤図(改訂版)資料編(II), 宮崎市, pp.46-47, pp.730-737, pp.741-742, 1998.
- 17) 横山淳一: 宮崎の地理(7), 宮崎の自然, 第8号, <http://miyazaki.4zen.jp/008/07/index.html>, 2014年6月参照.
- 18) J.W.Cooley, and J.W.Tukey: An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series, Mathematics of Computation, Vol.19, No.90, 297-301, 1965.
- 19) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 294p, 1994.
- 20) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.25-27, 2012.
- 21) 宮崎市: 宮崎市地盤図(改訂版)解説編 資料編(I), 宮崎市, 366p, 1998.
- 22) 宮崎県: 宮崎県地震被害想定調査報告書, pp.2-4 - 2-16, 1997.
- 23) 菅野高弘, 中澤博志, 小濱英司: 空港用地内における液状化被害予測のための物理探査事例, 港湾空港技術研究所資料, No.1247, <http://www.pari.go.jp/search-pdf/no1247.pdf>, 2014年6月参照.
- 24) 宮町宏樹・後藤和彦: 島弧としての九州の構造探査, 月刊地球号外, No.27, pp.222-226, 1999.
- 25) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 功乃卓, 石井透, 早川讓, 森川信之, 小林京子, 大井昌弘, 先名重樹, 奥村直子: 日向灘の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第296号, http://www.j-map.bosai.go.jp/j-map/result/tn_296/, 2014年6月参照.

(2014年6月23日 受付)