

高松市における常時微動観測の 卓越周期とボーリングの地盤周期との比較

加藤 想¹・鋤田 泰子²

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 131t109t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

本研究では、南海トラフ巨大地震の発生が懸念されている中、香川県高松市の表層地盤の震動特性を明らかにするため、単点の常時微動観測を行いH/Vスペクトルの卓越周期の分布を示した。その結果、沿岸の埋立地や市内東側の後背湿地で0.6s程度の卓越周期があることがわかった。また、常時微動の卓越周期とボーリング資料から得られた地盤特性値を比較したところ、両者に良い相関があることが分かり、0.8s以下の卓越周期は浅部の表層地盤の増幅によるものと考えられる。さらに、市内中央の詰田川周辺の平野部では0.8-1.5sの深い地盤構造による卓越周期もあることが確認できた。

Key Words: microtremor, H/V spectrum, predominant period of subsurface ground

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震以降、西日本では南海トラフを震源とする巨大地震の発生が懸念されており、強震動が想定される地域では地震対策が急がれている。香川県高松市もその一つであり、これまでに南海トラフ沿いで発生した地震によって度々地震・津波による被害を受けてきた。

全国的には広域な地震被害想定が進められているが¹⁾、個々の地域における地盤震動は局所的な地盤増幅特性の影響を受けるため、詳細な調査・分析が必要となる。常時微動観測は、簡便に地盤震動特性を把握する手法として、広く利用されてきた²⁾。先行研究として、斎藤・長谷川³⁾は高松平野を対象に微動観測を行い、H/Vスペクトルの卓越周期から沖積層、洪積層の地盤構造を推定している。本研究は、高松市において常時微動観測を行い、表層地盤の震動特性を明らかにするとともに、既存のボーリング資料との関係性について分析する。

また、最近では日本全国の地盤について約250mのメッシュで微地形やAVS30（表層30mの平均せん断波速度）の情報が提供され⁴⁾、国や地方における地震被害想定でも広く用いられている。とくに、地盤震動に関わるAVS30は、都市部のPS検層の資料を多く用いており、こ

こで構築された手法で全国の地盤のAVS30が算定されている。そこで、資料の少ない地域の地盤の特徴を上手く反映できるのか、本常時微動観測の結果から検討する。

2. 高松市における常時微動観測

高松市の地形は、市内の南に広がる花崗岩丘陵地帯と、北側の広大な沖積低地、さらに丘陵と沖積低地の間の更新世段丘から形成されている。高松平野は、主に扇状地から成る。沿岸には埋立地とその内陸に三角州が広がり、扇状地と三角州に挟まれた河川沿いに後背湿地が広がる。市内には、東側から新川、詰田川、香東川、本津川の四つの河川が瀬戸内海に向かって流れている。

高松市の常時微動観測を実施するにあたり、高松市全域の微地形⁵⁾を網羅し、市域を広く包囲するように等間隔で35箇所を選定した。また、観測点の周辺には後述するボーリングの資料がある。観測は、2012年の8月と同年11月末の2回に分けて行った。交通振動などの外部の影響を受けないように、交通量の多い道路から離れた公園や神社、駐車場を観測場所とした。また、交通量の多い市街地では、早朝の交通量の少ない時間帯に観測を行った。

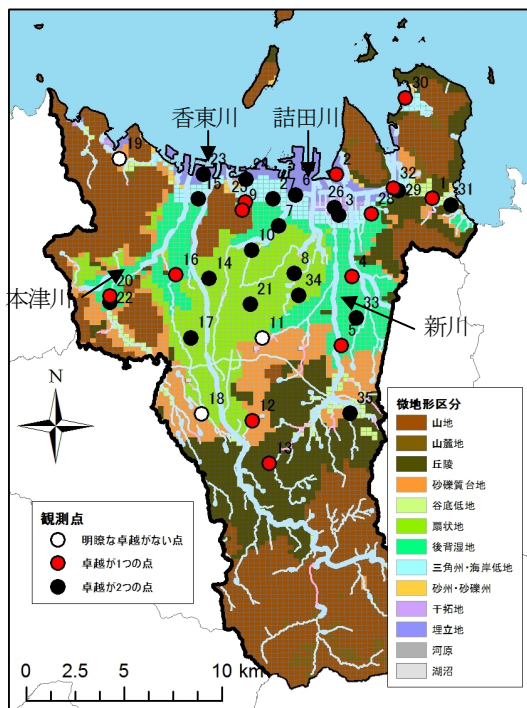


図-1 高松市の微地形分布と観測点のH/Vスペクトルの特徴

使用した微動計は、CR4.5-2s（物探サービス株式会社製）である。観測点一箇所につき、サンプリング周波数100Hzで、東西、南北の水平2成分と鉛直成分の3成分を約10分間同時計測した。

3. 微動観測による卓越周期に関する分析

(1) H/V スペクトルの特徴

地盤の震動特性を分析するにあたり、鉛直微動の振幅に対する水平微動の振幅の比をとったH/Vスペクトルを用いる。H/Vスペクトルの算出方法は、微動計によって記録された微動波形から振動が安定している2,048データ長の波形を10波抽出し、高速フーリエ変換によって得られたフーリエスペクトルを10波で平均し、一成分のフーリエスペクトルとする。さらに、水平二成分の幾何平均を水平成分のスペクトルとし、鉛直成分で除することでH/Vスペクトル比を算出する。

図-1は微地形⁹⁾の上に35観測点の位置と観測点番号を示している。H/Vスペクトルの特徴を分析するにあたり、スペクトルの形状から、明瞭な卓越周期が1つ見られるH/Vスペクトル、明瞭な卓越がみられないH/Vスペクトル、明瞭な卓越周期が2つ見られるH/Vスペクトルの3種類に区別した。図中の観測点の記号は、その分類を示している。以下に、これらの特徴についてH/Vスペクトル（図-2、3、4）と微地形⁹⁾との関係から考察する。

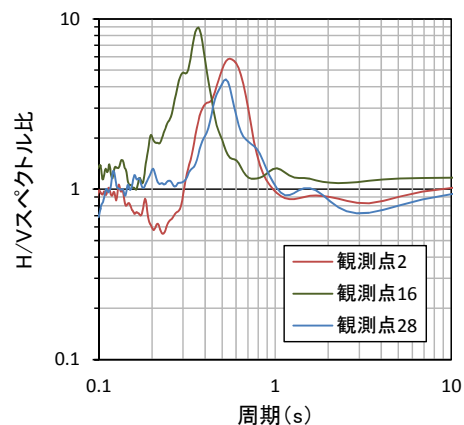


図-2 明瞭な卓越周期が1つあるH/Vスペクトル

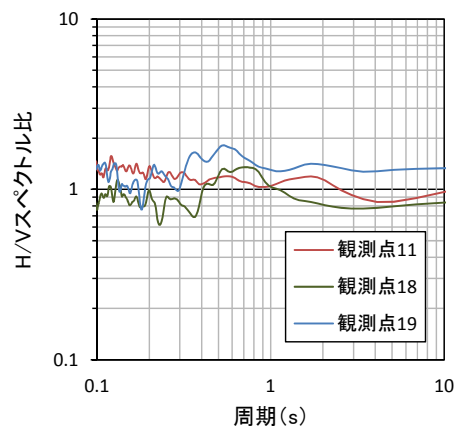


図-3 明瞭な卓越がないH/Vスペクトル

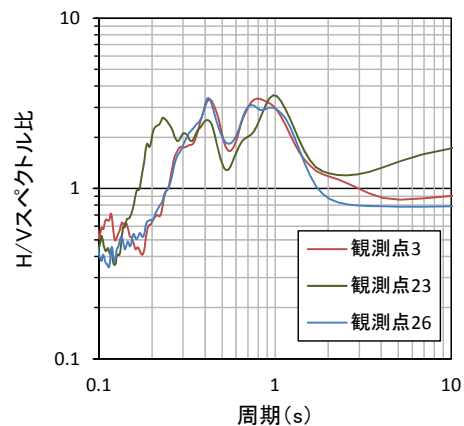


図-4 明瞭な卓越が2つ見られるH/Vスペクトル

a) 明瞭な卓越周期が1つあるH/Vスペクトル

常時微動観測では、一般に表層地盤の固有周期に相当する周期でH/Vスペクトルに一つの卓越周期が見られる。図-2はこの特徴をもつ観測点のスペクトルを示している。これらの観測点の微地形は、谷底低地や新川、香東川、本津川沿いの後背湿地や埋立地と市内南側の台地や丘陵である。

b) 明瞭な卓越がないH/Vスペクトル

この分類の観測点のH/Vスペクトルを図-3に示す。全体に占める観測点の数は3箇所と少ないが、0.1sから10sの範囲においてスペクトル比が2以下のものとした。

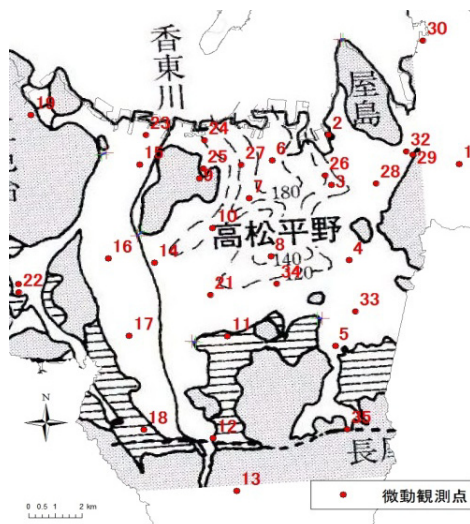


図-5 基盤花崗岩の深度と微動観測点

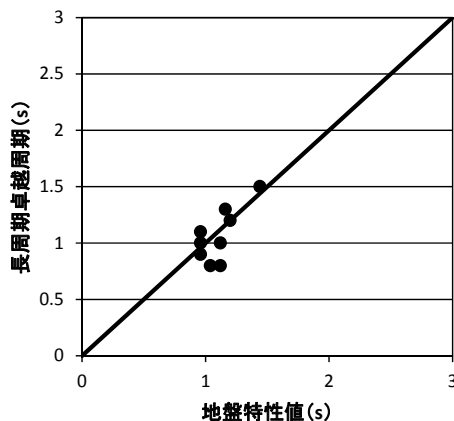


図-6 長周期側の卓越周期と深部地盤の T_0 との関係

観測点の微地形はいずれも砂礫質台地である。これは、基盤の上にある表層地盤とのインピーダンス比が大きく、増幅は大きくみられなかったものと考えられる。

c) 明瞭な卓越周期が2つ見られる H/V スペクトル

図-4 にこの分類の観測点の H/V スペクトルの一例を示している。観測点によって卓越周期は異なるが、短周期側の卓越周期は 0.6s 以下であり、長周期側の卓越周期は 0.8~1.5s 程度である。観測点の共通点として主に高松平野の詰田川沿いの扇状地から沿岸の海岸低地や埋立地にある。

高松平野の地盤構造から考えて 1s 付近の卓越周期は工学的基盤までの表層地盤ではなく、洪積層以下の深部地盤による増幅が作用していると考えられる。そこで、1s 付近の H/V スペクトルの卓越周期と深部地盤との関係について考える。

図-5 は基盤花崗岩の等深度線⁹⁾に微動観測点の位置を重ねたものである。図中の数字は観測点番号を示す。図-5 からは、高松平野の詰田川流域に-120m から-180m の

表-1 微地形と卓越周期

地形分類	卓越周期(s)
丘陵	0.2
台地	0.3
谷底低地	0.12~0.23
扇状地	0.14~0.4
後背湿地	0.21~0.57
三角州	0.2~0.45
干拓地	0.4
埋立地	0.21~0.65

深度があることがわかる。斎藤・長谷川⁷⁾は、K-NET 高松周辺にある PS 検層の結果から洪積層のせん断波速度は $V_s=500\text{m/s}$ 以上と仮定している。図-5 から微動観測点での基盤花崗岩層までの深度を算定し、著者らも洪積層以深の地盤のせん断波速度を $V_s=500\text{m/s}$ と仮定して、深部地盤の地盤特性値を算出した。

図-6 は、明瞭な卓越周期が2つ見られる H/V スペクトルを持ち、基盤花崗岩の等深線のある地域の観測点について、深部地盤の地盤特性値と長周期側の卓越周期との関係を示している。図からもこの2つの指標には良い相関があることがわかる。高松平野における 1s 付近のスペクトルは洪積層以深の深部地盤の増幅と考えられる。

図-5 には詰田川周辺の基盤花崗岩の等深線のみが示されているが、香東川の流域でも 1s 付近に卓越周期が見られることから深部地盤の影響があると考えられる。高松平野の地盤震動特性を考える上で、表層の短周期側の固有周期だけでなく、深部地盤による 0.8~1.5s の周期についても影響していることが明らかになった。

また、斎藤・長谷川³⁾によって求められた常時微動観測の卓越周期は、観測点 23, 24, 26 などの沿岸部で 0.8s 近くになっており、著者らの長周期側の卓越周期に整合していた。また、それ以外の地域では、スペクトルのピークが二つの場合は短周期側の卓越周期と整合することを確認している。

(2) 微地形と卓越周期との関係

上述の分析から、H/V スペクトルの短周期側の卓越周期が表層地盤の増幅を表していると考え、この卓越周期と微地形との関係を考察する。表-1 に微地形ごとに卓越周期をまとめたものを示す。また卓越周期の分布を図-7 に示す。図-7 において卓越周期が 0s と示している観測点は H/V スペクトルにおいて明瞭な卓越が見られなかった観測点である。短周期側の最大の卓越周期は埋立地で観測された 0.65s であった。また、埋立地の東側沿岸部と干拓地、三角州、後背湿地において卓越周期は長く、0.3~0.6s となっており、比較的軟弱な地盤であることが分かる。また、市南部の丘陵や台地では卓越周期は 0.1~0.2s と短く、比較的硬い地盤であることが分かる。

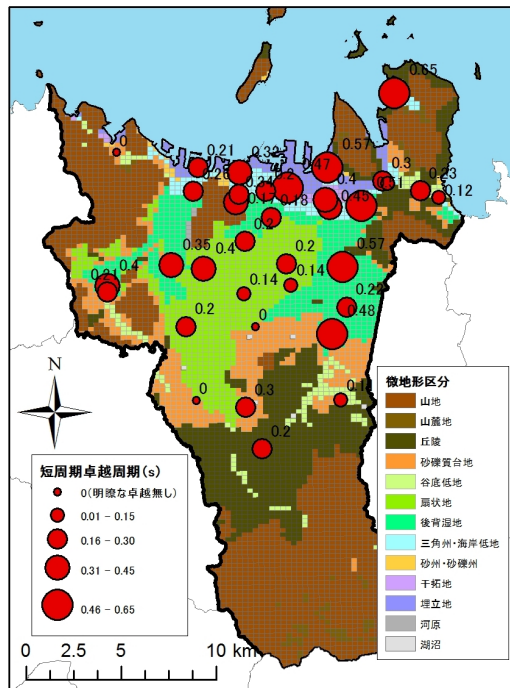


図-7 短周期卓越周期の分布

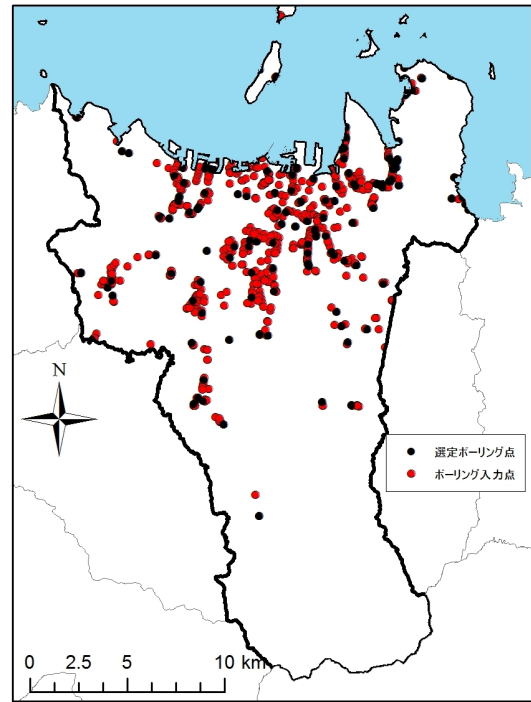


図-8 ボーリング入力地点と選定地点

また、後背湿地では0.21～0.57s，三角州では0.2～0.45s，埋立地では0.21s～0.65sと同じ微地形の観測点でも数値にばらつきがみられるため，微地形だけでは地盤震動特性を把握するのは不十分であることが分かる。

4. ボーリングデータの地盤特性値と常時微動の卓越周期

(1) ボーリングのデータベース化

常時微動観測の結果を検証するにあたり，高松市域のボーリングの情報を高松市上下水道局から提供いただいた。高松市内において千本近くのボーリングが紙媒体で保管されており，デジタルデータ化されていない。そこで，本研究ではボーリングデータの収集を行い，デジタルデータベースを作成した。

まず，ボーリングの資料の内，ボーリング柱状図があり，かつ位置が特定できる 834 地点を GIS 上で位置座標を与えた（図-8 中のボーリング入力点）。その 834 地点の中から微動観測点に近い点と市内の各微地形を網羅するようにして 144 点を選定した（図-8 中の選定ボーリング点）。この 144 点についてはボーリング資料から 1m ごとに N 値と粘性地盤・砂質地盤の地盤種の情報を入力した。なお，40 以上の N 値が 2m 以上続いた場合，それらの層より下部は工学的基盤とみなし，それより深い地盤については考慮しないものとした。

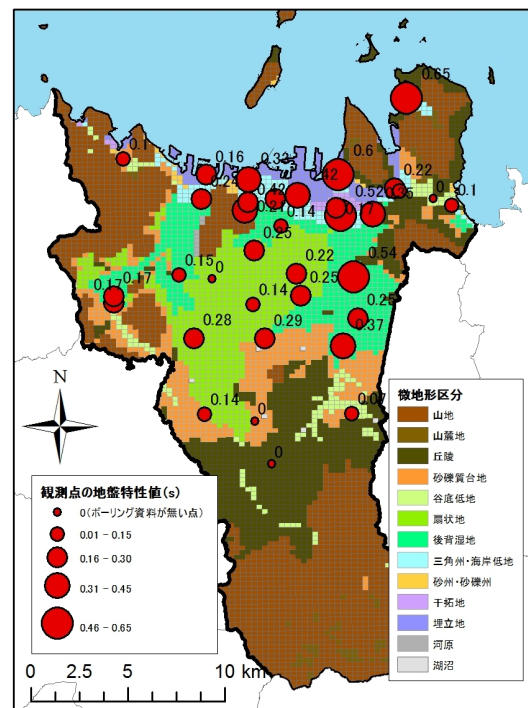


図-9 地盤特性値と微地形

表-2 微地形と地盤特性値

地形分類	地盤特性値(s)
丘陵	なし
台地	0.1～0.29
谷底低地	0.1
扇状地	0.14～0.28
後背湿地	0.15～0.54
三角州	0.21～0.52
干拓地	0.17
埋立地	0.16～0.65

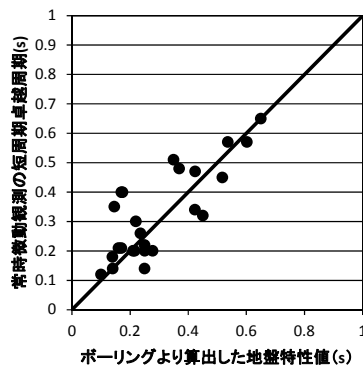


図-10 常時微動の卓越周期と地盤特性値

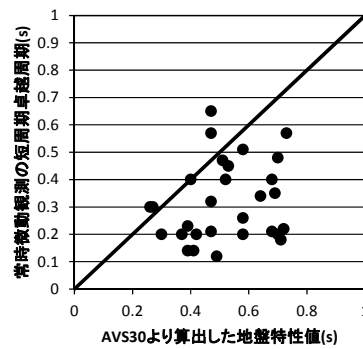


図-11 常時微動の卓越周期と AVS30⁹⁾から算出した地盤特性値

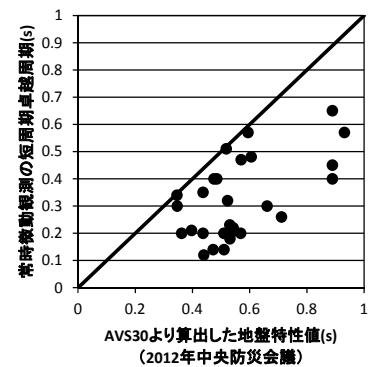


図-12 常時微動の卓越周期と中防の AVS30 から算出した地盤特性値

(2) 地盤特性値と微地形の関係

微動観測を行った地点に最も近いボーリングのデータを用いて、道路橋示方書⁸⁾にしたがい地盤特性値 T_G を算出した。微動観測した 35 地点のボーリングの地盤特性値を図-9 に示す。地盤特性値が 0 の観測点 1, 12, 13, 14 は観測地点付近にボーリング資料がなかった地点である。図-7 に示した常時微動の卓越周期の分布特性と非常によく似ていることがわかる。とくに、瀬戸内海の沿岸と新川周辺の後背湿地で周期が長くなっている。また、微地形ごとに地盤特性値をまとめた表-2 より、地盤特性値が埋立地では 0.65s と比較的長いことが分かる。台地では 0.1~0.29s 程度であり、硬い地盤であることがわかる。また、後背湿地では 0.15~0.54s、三角州では 0.21~0.52s と同じ微地形でも数値にばらつきがみられた。

(3) 微動による卓越周期と地盤特性値

微動観測による短周期側 (0.8s 以下) の卓越周期とボーリングから算出した地盤特性値との関係について分析する。周辺にボーリング資料のない観測点や微動観測で卓越周期の値がない観測点を省き、微動観測の卓越周期と地盤特性値との関係を図-10 に示す。0.1~0.2s の差異はあるものの、0.1s から 0.6s の範囲にわたって常時微動の卓越周期とボーリングの地盤特性値には比較的良好な相関があることが分かる。沿岸周辺の観測点 23, 24, 26 では、H/V スペクトルに二つのピークが見られ、長周期側は 0.8~1.0s であったが、同じ地点の地盤特性値をみると短周期側の卓越周期に近いことがわかる。つまり、常時微動観測で得られた短周期側の卓越周期は、工学基盤までの表層地盤の増幅を示唆していたことが確認できる。

一方、J-SHIS による AVS30⁹⁾から推定した地盤特性値と常時微動の卓越周期との関係を分析する。J-SHIS の AVS30 分布は、周辺に PS 検層のデータが少ないことから、河川や海岸からの距離によって推定されているもの

の微地形に依存した分布となっている。分析に用いた AVS30 の地盤特性値は表層の地盤深さを 30m として算出したものである。その関係を図-11 に示す。常時微動の卓越周期に比べて AVS30 から推定した地盤特性値は全体的に大きく、観測点によっては 0.5s 近く差があることがわかる。図からも両者により相関がみられない。

次に、2012年に中央防災会議（以下、中防と呼ぶ）⁹⁾は南海トラフ巨大地震の想定にあたり、想定地域の地盤モデルを構築した。ここでの各250mメッシュのAVS30は、従来通り、ボーリング及びPS検層のデータを基に設定し、それらの資料が欠ける部分については微地形を基にして求めている。ボーリング本数が約49万本（従来の3.8倍）、PS検層本数が約2800本（従来の約1.2倍）を用いており、松岡ら¹⁰⁾の分析よりも地盤情報はさらに増加している。高松市のAVS30の推定にあたり、瀬戸内海沿岸ではボーリング資料があるため、ボーリングを軸に推定されている。一方、市の南側ではボーリングのデータが少ないために、微地形による推定方法になっている。

図-12は中防のAVS30から算出した地盤特性値と常時微動の卓越周期との関係を示している。常時微動の卓越周期は0.1~0.65sであるのに対し、中防のAVS30の地盤特性値は0.3~0.9sに増大し、全ての観測点で卓越周期と同じかそれよりも大きな地盤特性値になることがわかった。

常時微動の卓越周期とボーリングの地盤特性値が合う一方で、全国的な被害想定に用いられる地盤データと上手く整合しない理由について、微地形と関連させながら考察を行う。図-13、図-14 は常時微動の卓越周期と J-SHIS、中防の AVS30 より算出した地盤特性値との差の分布を微地形図に重ねたものを示している。J-SHIS の AVS30 が微地形に依存していることを考慮すると、沿岸の埋立地や丘陵、山地では常時微動の卓越周期より若干大きめに出ているが、後背湿地や扇状地になるとさらにその差が大きくなる。また、中防の AVS30 の地盤特性値と比較すると、沿岸の中央部や本津川流域の内陸などの常時微動の卓越周期とほとんど差がない地域と、内

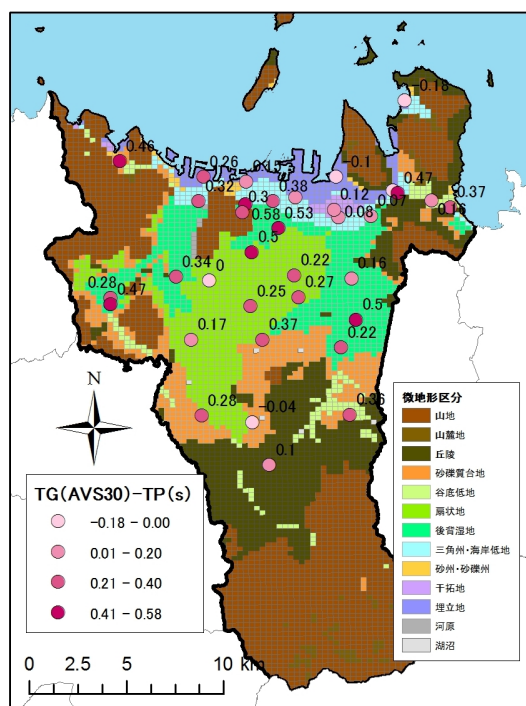


図-13 J-SHIS の AVS30 より算出した地盤特性値と常時微動の卓越周期との差の分布

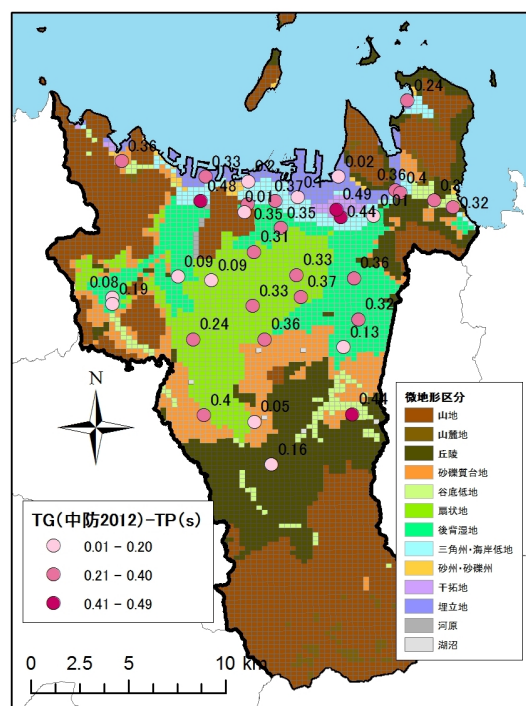


図-14 中防の AVS30 より算出した地盤特性値と常時微動の卓越周期との差の分布

陸の中央にある扇状地・後背湿地を中心に 0.3s 以上の差がある地域に分かれる。沿岸部ではボーリングを利用して AVS30 が推定されていることが見込まれるが、著者のまとめたボーリングの表層厚からも高松市域には掘進長が 30m 以上のものは少なく、AVS10 もしくは AVS20 から推定したものと考えられる。そのため、やや小さめの AVS30 が推定された。一方、内陸の後背湿地や扇状地では、微地形による AVS30 の推定が行われたと見込まれる。この場合、内陸の扇状地と砂礫質台地は、標高や傾斜などから AVS30 を推定され、後背湿地については都市部を中心とする PS 検層の AVS30 の中央値から推定されている。これらの推定の過程では、方法に関わらずいずれも AVS30 が安全側に推定されていると考えられる。

本分析から、地方都市ではボーリングのデータが少ない地域や、ボーリングの掘進長が 30m 以下の地域は数多くあり、これらの地域の地盤モデルは都市部の地盤データを中心に構築された PS 検層と微地形の分析結果から外挿していることが考えられる。防災の観点から安全側に推定することも一つではあるが、それぞれの地域において固有の地盤震動特性を丁寧に把握することも重要である。本研究では、幸いにも紙媒体で保管されていたボーリングの資料があったため、このような比較分析をすることができた。

今後は、本研究の結果や構築した地盤データを用いて地域の地震防災に役立てることが必要である。

5. 結論

本研究は、高松市における地盤震動特性について明らかにするために、常時微動観測を行い、H/V スペクトルの卓越周期から表層地盤の周期を明らかにした。さらにボーリング資料による地盤特性値と AVS30 の関係について確認した。以下の通りにまとめられる。

- 常時微動観測によって高松平野では 0.2~0.6s の卓越周期が得られ、段丘や丘陵では 0.1~0.2s の卓越周期となることがわかった。
- H/V スペクトルに明瞭な卓越周期が 2 つ見られる観測点では、0.8~1.5s の長周期側の卓越周期は洪積層以深の地盤構造による地盤増幅であることがわかった。
- 常時微動観測の卓越周期とボーリングの地盤特性値には良い相関があるが、AVS30 から推定した地盤周期は常時微動観測の卓越周期よりも過大評価していることが示された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、高松市上下水道局より高松市のボーリング資料を提供して頂いた。また、内閣府より 2012 年の南海トラフ巨大地震に用いた地盤の AVS30 の情報を提供して頂いた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：南海トラフの地

震の長期評価（第二版）について、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/nankai2_shubun.pdf

- 2) 中村豊，上野真：地表面振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
- 3) 斎藤章彦，長谷川修一：常時微動観測による高松平野の地盤振動特性の推定，四国電力，四国総合研究所研究報告，No.80，pp.94-99，2003
- 4) 松岡昌志，若松加寿江：地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ，産業技術総合研究所，知的財産管理番号 H20PRO-936，2008
- 5) 若松加寿江，松岡昌志：地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版の構築，日本地震工学会大会－2008 梗概集，pp.222-223，2008
- 6) 太田陽子：日本の地形 6 近畿・中国・四国，東京大学出版，pp.232-233，2004
- 7) 斎藤章彦，長谷川修一：常時微動測定による高松平野の地盤構造の推定，土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部，58巻，pp.581-582，2003
- 8) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012
- 9) 中央防災会議，南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai_trough/nankai_trough_top.html（2013.9 閲覧）
- 10) 松岡昌志，若松加寿江，藤本一雄，翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定，土木学会論文集 No.794/I-72，239-251，2005.7

COMPARISON OF PREDOMINANT PERIOD OF MICROTREMOR WITH GROUND NATURAL PERIOD BY BORING LOG IN TAKAMATSU CITY

So KATO and Yasuko KUWATA

This study attempts to clarify seismic site amplification by H/V spectrum of microtremor observation in Takamatsu City, Kagawa Prefecture. As a result, the longest predominant period about 0.6 second was observed in reclaimed land and back swamp in the east of Takamatsu basin. The predominant period of H/V spectrum and ground natural period by boring log have a good agreement. The predominant period less than 0.8 second is the amplification of shallow subsurface ground. Furthermore, the predominant period of H/V spectrum in the center of Takamatsu basin shows the ground amplification of deep ground structure.