地表単点での常時微動観測に基づく高知市の簡易な地盤モデルの構築

三神　厚[1]・谷口　純一[2]

[1]正会員　徳島大学准教授　工学部建設工学科（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）
E-mail: amikami@ce.tokushima-u.ac.jp

[2]徳島大学学生　工学部建設工学科（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1）
E-mail: c501001056@tokushima-u.ac.jp

著者らは，簡易な地盤調査として地表の単点で行う3成分常時微動観測を取り上げ，そこから得られる地盤情報と精度のバランスを考えた簡易な地盤モデルについて提案している．本研究は，その手法を南海地震の再来が危惧されている高知市中心部に適用するものである．高知市は多くの河川が河口部で合流し，浦戸湾に注ぎ込む場所に立地する沖積低地で，0m地帯が広がっている．基盤構造は複雑で，河口に近づくにつれ，堆積層厚が厚くなる傾向にある．市内の公園や小学校のグラウンドを利用し，24点で常時微動観測を行い，H/Vスペクトル比を算出したところ，浦戸湾に近づくにつれ，地盤の卓越振動数が小さくなっていく傾向が得られた．既往の文献等を参考にして得られる基盤深さの情報と併せ，簡易な地盤モデルを構築した．

Key Words : *microtremor, H/V spectral ratio, simplified ground model,Nankai earthquake*

1.　はじめに

トンネルやライフラインなどの線状構造物や長大橋，河川堤防など，地震波の波長に対し，構造物が十分な平面的な広がりを有する場合には，構造物の各点において，強度や位相の異なった地震動が入力されることになる．このような地震動入力を与えるには，基礎地盤の3次元的な挙動を把握する必要がある．

地震動の位相差は，表層地盤の違いによって生じる他，地震動が基盤に斜め入射するような場合も起こる．このような3次元的な地盤の挙動を精度良く推定する手法として，有限要素法や差分法などの精緻な数値解析手法があるが，併せて，大量かつ高精度な地盤データも必要となる．近年，Kunijiban[1)]などで地盤データの公開が進んでいるものの，得られるデータはボーリングデータに基づくN値の場合がほとんどで，精度の面でアンバランスである．

著者らは，これまで多点で実施可能な簡易な地盤調査手法として，地表単点で行う3成分常時微動観測に着目し，この調査から得られる情報に見合った精度や簡便さを有する地盤モデルを構築する手法を提案してきた[2)]．この手法ならば，広域をカバーする地盤調査の実施が可能で，かつ，地盤モデルも簡易であるため数値計算に要する手間も少ない．

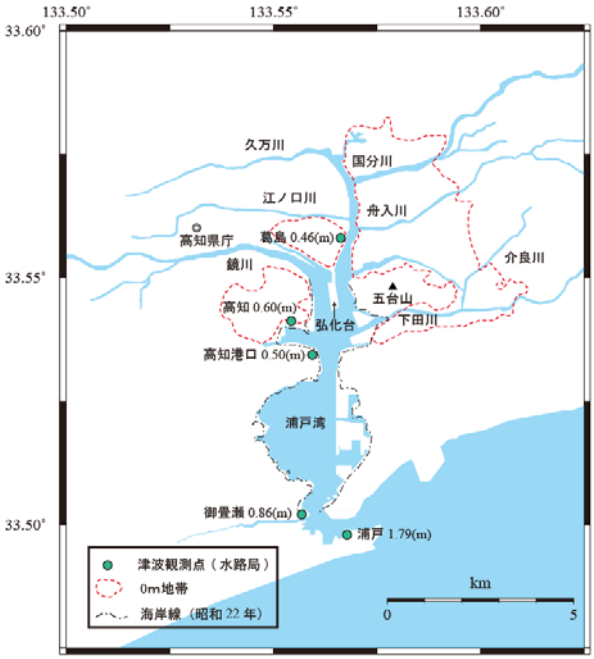

図-1　高知市中心部

本研究ではこの手法をを高知市中心部に適用する．内閣府が2012年8月29日に公表した「南海トラフの巨大地震による津波高・浸水域等（第二次報告）及び被害想定

（第一次報告）について」[3]によれば，高知市は最大16mの津波に襲われ，また浸水面積は3,380(ha)にも及ぶと予想されている．地震の規模が最大級で，津波が堤防をはるかに超える場合にはソフト的な対策，すなわち避難を中心とした減災対策がメインとなるが，津波高がさほど大きくならなかった場合には，遡上する津波を堤防で津波を防御するハード対策がより重要である．

図-1は高知市中心部を示すが，いわゆるゼロメートル地帯が広がっている．高知市の場合太平洋の入り口がせまく，浦戸湾が広がりを有するため，津波高さは抑えられるようで，実際，昭和南海地震では高知市の中心部に至るあたりでは，50-60(cm)の津波高となっていたことが報告されている．地震の規模の予測は難しく，発生してみないとわからないので，種々のケースを想定した対策が求められる．津波高がさほどでもないとなったならば，地震動による堤防の被害を防なければならない．また，橋梁やライフラインの地震被害を最小に食い止め，迅速な復興を目指さなければがなければならない．また南海地震の新想定では，震源断層が高知市の直下にあり，その場合には地震動が斜め入射となる可能性が考えられる．

本研究では，高知市の多点において実施した常時微動観測に基づき，高知市中心部の地震応答解析に用いるための簡易な地盤モデルを構築する．

2. 簡易な地盤調査との精度のバランスを考えたモデル

ここでは，著者らが提案するモデルを簡単に紹介する．詳しくは，三神，小長井[2]を参照されたい．

(1) モデルの概要

簡易な地盤調査手法として広く用いられている地盤の常時微動観測を広域，多点で行い，H/Vスペクトル比が得られるとした場合に，それから得られる地盤情報の精度に見合った簡便な解析手法を提案するものである．

(2) 地表の単点における常時微動観測

地表単点において3成分（水平2成分，鉛直1成分）の常時微動観測を行うことで，それぞれのフーリエスペクトルを求め，スムージングした後，水平成分と鉛直成分の比をとることでH/Vスペクトル比を求めることができる．微動のH/Vスペクトル比のピーク振動数から，その場所での卓越振動数を推定することができる．

(3) 簡易な地盤調査と精度のバランスを考えたモデル

地表単点の常時微動観測から，当該地点での卓越振動数を推定する一方で，既存のボーリングデータや文献情報をもとに基盤までの深さHを求めると，1/4波長則から，基盤上の沖積地盤の平均的なS波速度を求めることができる．

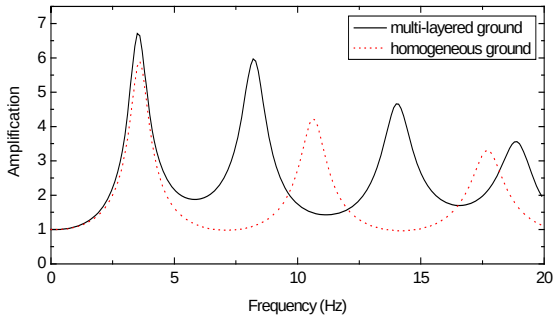

図-2 伝達関数の比較

そこで，もとの多層地盤を基盤上の一様表層地盤に置き換える．ここでは，置き換える前後でそれらの地盤の卓越振動数が等しいという意味で，もとの地盤に対し，「等価な一様地盤」として表現する．地盤の応答特性について，この等価な一様地盤の適用の限界について検討するため，サイト応答関数を求めてみる．

図-2は，多層地盤と，等価な一様表層地盤について，サイト応答関数を求めた結果である．多層地盤のモデルとしては，大崎[4]を用いた．横軸に周波数をとり，縦軸に露頭基盤から表層までの増幅をとっている．実線が多層地盤による結果，点線が簡易地盤による結果である．この例では，双方の地盤モデルとも約3(Hz)あたりに1次モードのピークが表れている．ピークの高さは地盤のインピーダンス比に依存するが，1次モードではほぼ一致している．

2つの地盤モデルによる伝達関数の一致度について検討すると，1次モード周辺までは良く一致しているが，それより高次のモードではピークが表れる周波数の位置，ピークの高さとも一致しなくなる．この結果は，簡易な地盤モデルは実地盤(多層地盤)の1次モード程度までは精度よく近似するので，地盤の深さ方向に対し，1次モードを仮定し，さらに地盤モデルを簡便化する方法が考えられる．

そこで，深さ方向に対し，1次の振動モードを仮定し，深さ方向にGalerkinの方法を適用するNogamiら[5]の定式化を行うと，最終的に以下の式が得られる．

$$\rho^* \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + k^* U = (\lambda+\mu)^* \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) + \mu^* \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) U$$

$$\rho^* \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + k^* V = (\lambda+\mu)^* \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) + \mu^* \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) V$$

(1), (2)

ここで，$\rho^*, k^*, (\lambda+\mu)^*, \mu^*$ は以下のように表わされる．

$$\rho^* = \int_0^H \rho\phi^2 dz$$

$$k^* = \int_0^H \mu\left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2 dz$$

$$(\lambda+\mu)^* = \int_0^H (\lambda+\mu)\phi^2 dz$$

$$\mu^* = \int_0^H \mu\phi^2 dz$$

(3)-(6)

これらの式は，Nogamiら[5]や田村ら[6]と同じ形をしている．ただし，田村ら[6]では，上下動を無視する代わりに上下方向の直応力を0とし，平面応力的にLameの定数の設定を以下のように変化させることで，先に無視した上下動の影響を擬似的に取り込む方法を採用している．

$$\lambda \rightarrow \frac{2\lambda\mu}{\lambda+2\mu} \tag{7}$$

一方，2次元の支配方程式は以下のように表わされる．

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)u$$

$$\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda+\mu)\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\mu\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)v$$

(8), (9)

これらの数式を比較すると，違いは k^*U と k^*V の項だけであることがわかる．これらの項は，基盤に対する地表面レベルの水平方向相対変位 U, V による復元力である．

3. 高知市における常時微動観測

(1) 高知市の地形的な特徴

図-1に示すように，鏡川，国分川など，多くの河川が高知市を貫流した後，浦戸湾に注いでいる．高知市はこれらの河川の河口部の沖積低地に位置している．また，地震性の沈降平野であり，地震の度に沈降を繰り返してきた．そのため，現在ではゼロメートル地帯が広がっている．

(2) 高知市の基盤図

図-3は，高知地盤図[7]に示される沖積層基底面深度図（土木工学的にいう支持層上限面図）を，平成20年国土地理院発行の1/25,000地形図に書き入れたものである．この沖積層基底面深度図は，高知平野における1000本以上のボーリングデータをもとに作成されたものである．これとは別に，基盤岩上面深度図がある．これは，未固結の第4紀地層をはぎ取ったその下位に埋没分布している基盤岩の深さである．

(2) 常時微動観測

著者らは，2013年8月末までに，高知平野の24点において常時微動観測を実施している．

a) 観測の方法

サーボ型速度計（東京測振，SPC-35）を用い，地表面において，約10分間の観測を行う．風が少ない日や時間帯に，公園や学校のグランドなどで実施した．

b) 観測記録の処理方法

約10分の記録のうち，交通振動など，周囲の影響の少ない約20秒区間（2048データ）を5区間を取り出し，それぞれ平滑化したのち，東西，南北でさらに平均化する．平滑化の方法としてはParzen window，バンド幅0.4Hz を用いた．水平と鉛直のスペクトル比をとり，H/Vスペクトル比を求める．

c) 観測結果

図-4に観測結果の一例を示す．このような図から，ピークを与える振動数を求め，それを当該地点における卓越振動数の推定値とする．候補となるピークが複数ある場合には，第2ピークを用いる場合もあるが，これまでの著者らによる高知市における観測では，この例のように，H/Vスペクトル比の明瞭なピークが1つ現れる場合が多い．

d) 観測結果の一覧

図-3には常時微動観測を実施した地点の位置を併せて示しているが，各地点の微動記録から得られた地盤の卓越振動数について，観測結果一覧を表-1にまとめる．浦戸湾に近づくにつれ，地盤の卓越振動数の値が小さくなる傾向が読み取れる．

4. 高知市の地盤モデルの構築

(1) 高知平野の平均的なせん断波速度の推定

常時微動を求めた各地点について，基盤深度図[7]やボーリングデータを参考に，基盤までの深さを決定する．その上で，1/4波長則により，表層地盤の平均的なせん断波速度 $\overline{V_S}$ を次式から決定する．

$$T = \frac{4H}{\overline{V_S}} \tag{10}$$

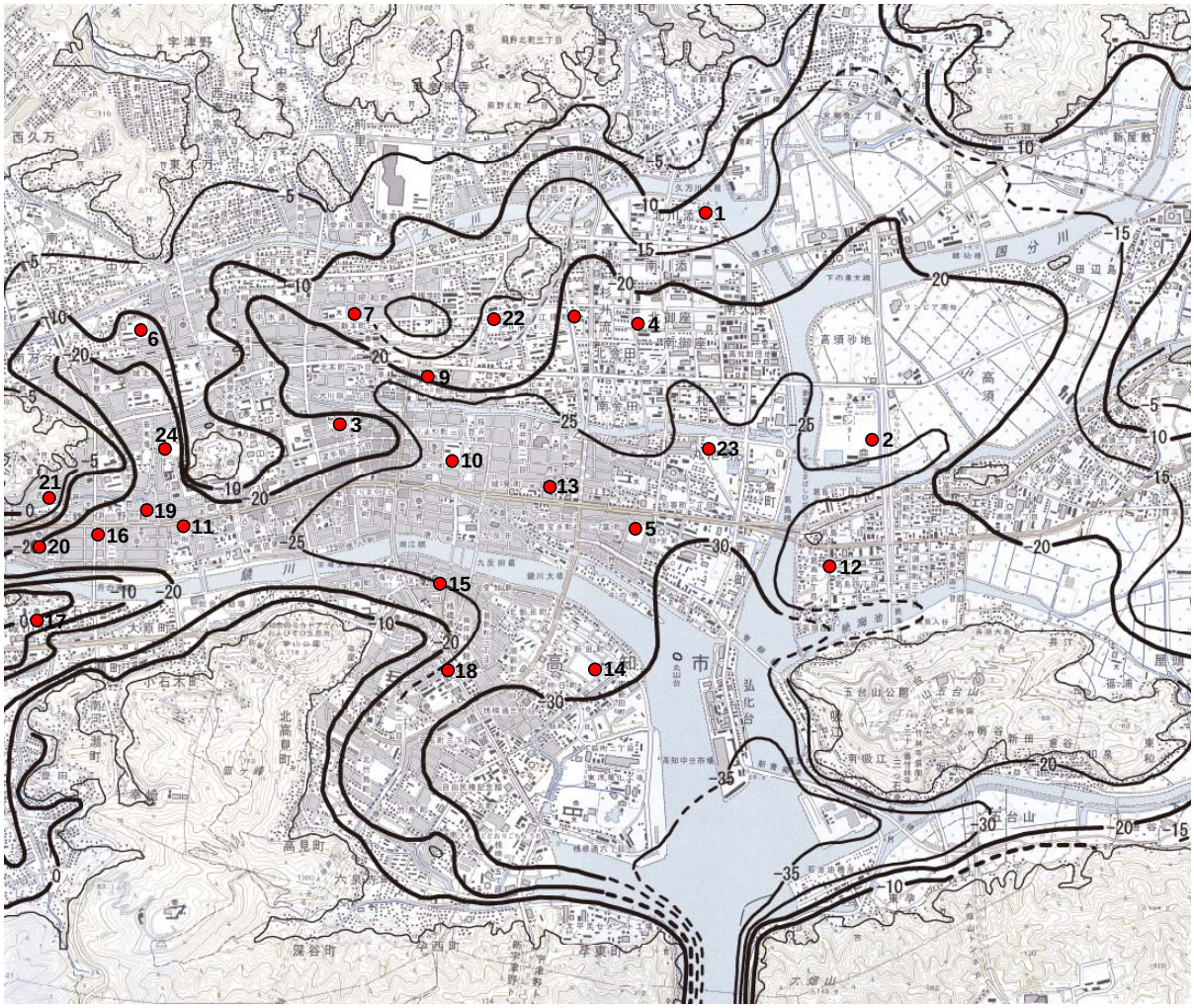

図-3 高知市中心部の沖積層基底面深度と微動観測地点
（平成 20 年国土地理院発行の 1/25,000 の地形図を使用）

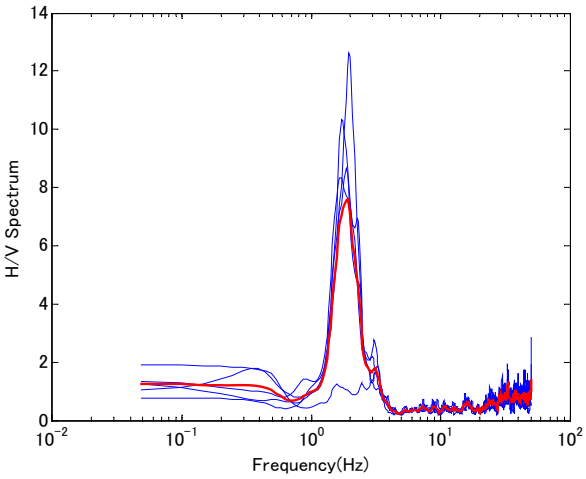

図-4 H/V スペクトル比の一例（地点 22）

(2) 高知平野のせん断波速度推定結果

表-1には，併せて，高知地盤図[7]から読み取った沖積層基底面深度と基盤岩上面深度も示す．ただし，読み取りが不可能な場合には，記入していない．さらに，これらの深度と地盤の卓越振動数から，地盤の平均的なせん断波速度も求めた．ここで，平均Vs_1とは，沖積層基底面深度H_1を基盤までの深さとして1/4波長則から求めた地盤の平均的なせん断波速度で，平均Vs_2とは，基盤岩上面深度H_2を基盤までの深さとした場合の平均的なせん断波速度である．この結果から，平均Vs_2の方が妥当な値を示していると思われるので，高知市中心部での微動記録から求められるH/Vスペクトル比のピークは，基盤岩を反映しているものと考えられる．これについては，PS検層データを入手するなどして，今後の検証が必要である．

表-1 微動観測地点ごとの卓越振動数

地点	卓越振動数 (Hz)	沖積層基底面深度 H_1(m)	基盤岩上面深度 H_2	平均せん断波速度 $Vs,_1$	平均せん断波速度 $Vs,_2$
1	1.51	12	-	72.5	-
2	0.98	16	-	62.7	-
3	1.32	18	34	95.0	179.5
4	0.88	22	>60	77.44	-
5	0.78	28	>60	87.36	-
6	2.29	12	30	109.9	274.8
7	1.56	17	42	106.1	262.1
8	1.27	20	45	101.6	228.6
9	1.27	20	55	101.6	279.4
10	0.93	27	>60	100.4	-
11	1.42	23	50	130.64	284.0
12	1.46	23	-	134.3	-
13	0.93	27	>60	100.4	-
14	0.78	28	>60	87.36	-
15	1.07	25	>60	107.0	-
16	2.73	22	50	240.24	546.0
17	2.05	-	14	-	114.8
18	1.42	20	35	113.6	198.8
19	1.46	22	50	128.5	292.0
20	2.39	20	50	191.2	478.0
21	2.64	-	25	-	264.0
22	1.9	16	30	121.6	228.0
23	0.98	27	>60	105.8	-
24	1.66	23	27	152.7	179.3

5. まとめ

広域，多点で実施可能な簡易な地盤調査との精度のバランスを考えた地盤モデル化手法を，南海地震の再来が危惧されている高知市に適用した．

高知市の中心部の24地点について，3成分常時微動観測を地表面レベルで行い，H/Vスペクトル比を求め，地盤の卓越振動数を推定した．その結果，沖積層厚が厚くなる浦戸湾に近づくにつれ，地盤の卓越振動数は小さくなった．

常時微動観測によって求められた卓越振動数と，当該地点における基盤深度の推定値から，平均的なS波速度を算出するにあたり，沖積層基底面深度と基盤岩上面深度の2つを用いてみた．その結果，基盤岩上面深度を用いた場合の平均せん断波速度の推定結果の方が妥当と思われる結果となった．このことから，微動のH/Vスペクトル比のピークは，基盤岩上面を反映して生成されているものと考えられるが，今後，PS検層データを用いた検証を行う必要がある．

謝辞： 本研究は，日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤研究(C), 代表=三神厚，課題番号=25420486）の助成を受けたものです．論文中の一部の図の作成にあたっては，GMT(Generic Mapping Tools)[8),9)]を使用させて頂きました．関係各位に感謝の意を表します．

参考文献

1) 国土交通省：国土地盤情報検索サイト，Kunijiban，http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/.
2) 三神 厚，小長井一男：簡易な地盤調査との精度のバランスを考えた広域における地盤モデル化手法，土木学会地震工学論文集，Vol.31, pp.172-178, 2010.
3) 内閣府：防災情報のページ，http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/index.html（2013 年 9 月 19 日閲覧）
4) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門(p.190)，鹿島出版会，1994.
5) Nogami, T., Konagai, K. and Mikami, A.: Simple formulation of ground impedance functions for rigid surface foundations, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.21, No.6, pp.475-484, 2001.
6) Tamura, C., Konagai, K. and Suzuki, T.: Earthquake response analysis of soft soil deposit on undulating bedrock, Report of the Institute of the Industrial Scinence, The University of Tokyo, Vol.36, No.5, pp.227-261, 1991.
7) 高知地盤図編集委員会：高知地盤図，高知県建築設計監理協会，1992.

8) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New improved version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. AGU, 79, 579, 1998.
9) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, 72, 441, 1991.

SIMPLIFIED GROUND MODEL OF CENTRAL KOCHI CITY DEVELOPED BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENTS

Atsushi MIKAMI and Jun'ichi TANIGUCHI

The first author has previously proposed a method of developing a simplified ground model based on microtremor measurements as the model is in congruity with preciseness of a simple soil investigation. In this study, the authors apply the method to central Kochi city, being located on alluvial lowland near a river mouth, which is though to be at potential risk of destructive tsunami damage due to the next Nankai earthquake. Microtremor measurements were conducted at 24 locaions of central Kochi city. With the help of information regarding depths of base rock, a simplified ground model is established. The observational results indicate that predominant frequencies of ground becomes smaller when it approaches Urado bay.