



地盤種別判定への常時微動測定の実用

沖村, 孝
鳥居, 宣之
堀江, 啓
余川, 千咲

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 11:255-264

(Issue Date)

2007-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD01)

<https://doi.org/10.24546/00518530>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00518530>



地盤種別判定への常時微動測定の適用

The Application of Microtremor Measurement to the Ground Classification

沖村 孝¹⁾

Takashi Okimura

鳥居 宣之²⁾

Nobuyuki Torii

堀江 啓³⁾

Kei Horie

余川 千咲⁴⁾

Chisaki Yokawa

概要：木造住宅の一般耐震診断や精密診断では、著しく軟弱な地盤とされる第三種地盤では必要耐力を 1.5 倍することとしている。よって、第一種及び第二種地盤と第三種地盤の判別することは重要である。そこで、本研究では、常時微動を活用した地盤種別判定方法を提案することを目的とする。具体的には、まず神戸市域の 78 点において常時微動測定を行い、その結果から地盤の卓越周期を推定した。つぎに、各測定点において算定式を用いて地盤の卓越周期を算出し、地盤種別を判定した。この結果と常時微動測定結果より推定した地盤の卓越周期を比較検討することにより、地盤種別を定量的に行う方法を提案した。提案した方法により地盤種別判定を行ったところ、良好な判別結果が得られた。

キーワード：耐震診断，常時微動測定，地盤の卓越周期，地盤種別判定

1. はじめに

1995 年に発生した兵庫県南部地震は、神戸市域を中心とする阪神・淡路地域に甚大な被害をもたらした。特に建築構造物の被害は著しく、全半壊合わせて 20 万棟以上の被害が発生した。被害分布の顕著な特徴は、震度 7 の激震地区、いわゆる「震災の帯」に代表されるような帯状を呈していたことである¹⁾。このような「震災の帯」の発生要因の一つとして、軟弱地盤における地震動の増幅が報告されている²⁾。この地震動の増幅特性は表層地盤の固有周期に依存しており、軟弱地盤では固有周期が長いため、地表で観測される地震動は長周期成分が増幅した地震動に、硬質な地盤では固有周期が短いため、短周期成分が増幅した地震動となる。したがって、建築構造物の被害を軽減するためには、地盤の振動特性を考慮した建築構造物の耐震化を促進することが重要であると考えられる。

木造構造物の耐震性能と地盤の関係について、建築基準法施行令 46 条において、地盤が著しく軟弱な区域として指定された区域では、通常の 1.5 倍の耐震強度とすることと定められている。これに対応して、木造住宅の一般耐震診断や精密診断³⁾でも、著しく軟弱な地盤とされる第三種地盤では必要耐力を 1.5 倍することとしている。よって、地盤を第一種及び第二種地盤と第三種地盤の判別をすることが特に重要であるといえる。ここで、著しく軟弱な地盤とは、特定行政庁が国土交通大臣の定める基準に基づいて規則⁴⁾で指定する区域であり、表-1 に掲げる第三種地盤に該当する区域である。

木造住宅の耐震診断における地盤種別の判断材料としては、1)スウェーデン式サウンディング試験、2)地形の踏査がある。スウェーデン式サウンディング調査は、低コスト(3~4 万円程度)で比較的簡便に行うことができるが、地盤内にガラが混じっていると貫入不可能となる場合があるという短所がある。一方、地形の踏査は、植生や造成の状況、周辺建物の異常の有無、周辺水路の有無、盛土に関する情報等を収集し判断を

表一 木造建造物の耐震設計における地盤種別の規準⁴⁾

地盤種別	地盤状況
第一種地盤	岩盤、硬質砂れき層、その他主として第三紀以前の地層によって構成されているもの、または地盤周期等についての調査若しくは研究の成果に基づき、これと同程度の地盤周期を有すると認められるもの
第二種地盤	第一種地盤及び第三種地盤以外のもの
第三種地盤	腐植土、泥土、その他これらに類するもので大部分が構成されている沖積層（盛土がある場合においてはこれを含む。）で、その深さがおおむね 30m 以上のもの、沼沢、沼海等を埋め立てた地盤の深さがおおむね 3m 以上であり、かつ、これらで埋め立てられてからおおむね 30 年経過していないもの又は地盤周期等についての調査若しくは研究の結果に基づき、これらと同程度の地盤周期を有すると認められるもの

行う⁵⁾が、定性的な判断であるといえる。そこで、より低コストで簡便に定量的な判断ができる手法を確立することが求められている。

また、地盤種別の判定は地盤の卓越周期についての特別な調査又は研究に基づいて行うことも可能である。その場合の方法としては、常時微動測定による方法やせん断波速度測定による方法等が提案されている⁶⁾。

本研究では、軟弱地盤における地震動の増幅特性を考慮した耐震診断手法の構築を目指して、常時微動を活用した住宅の耐震診断への活用可能な地盤種別の判定方法を提案することを目的とする。具体的には、常時微動測定に着目し、約 6,000 本のボーリングデータを収録した地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」⁷⁾に登録されているボーリング地点のうち、78 点において常時微動測定を行い、その結果から地盤の卓越周期を推定する。また、「神戸 JIBANKUN」⁷⁾に登録されているボーリングデータをもとに現在提案されている地盤の卓越周期の算定方法を用いて推定した地盤の卓越周期と、今回の常時微動測定結果から推定される地盤の卓越周期を比較検討することにより、地盤種別を定量的に行う方法を提案する。

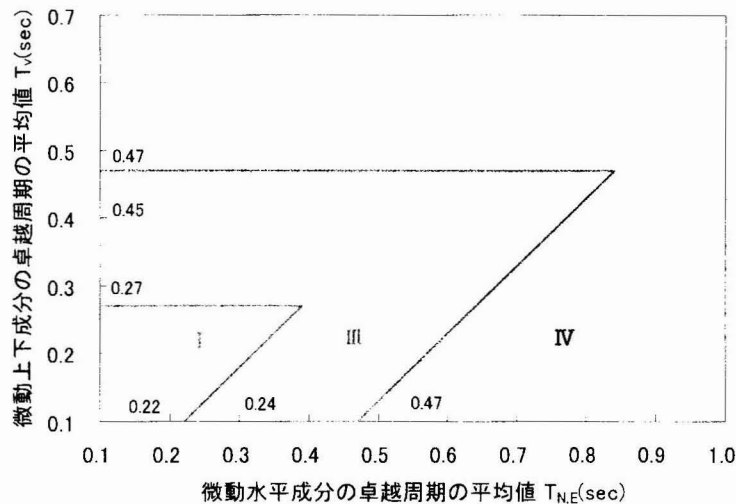
2. 常時微動に関する既往の研究

大町ら⁸⁾は、常時微動として従来対象とされてきた 0.1～数秒の周期範囲には、表面波が多く含まれていることから、常時微動は比較的浅い地盤構造を反映し、その上下成分はレイリー波の、水平成分はレイリー波とラブ波の特性に起因する性状を示すと考えた。このような考えをもとに、常時微動から地盤の卓越周期を精度よく推定する方法について検討している。その際、常時微動の水平動振幅スペクトルと上下動振幅スペクトルの比⁹⁾（以下、H/V スペクトルと呼ぶ）を用いて地盤の卓越周期の推定を行っている。さらに、PS 検層が既に行われている地点について、常時微動及びレイリー波の振幅比スペクトルからピークと谷の周期をそれぞれ読み取り、ピーク周期と谷周期の比について比較検討を行っている。その結果、常時微動の測定及び解析処理によって得られる H/V スペクトルから地盤の卓越周期を推定する方法を以下のように定めた。

- ・ H/V スペクトルが逆 N 字形で明瞭なピークがあり、このピーク周期の約半分のところに明瞭な谷が見られるとき、このピーク周期が高い確度でその地盤の卓越周期とみなせる。
- ・ H/V スペクトルに明瞭なピークが二つ以上ある場合、最大のピークを与える周期が卓越周期である確度が高い。
- ・ 明瞭なピークが見られない場合、基本的には最大ピークを与える周期を卓越周期とする。ただし、明瞭なピークが見られないが、明瞭な谷が見られる場合は、この谷周期の 2 倍程度の周期にピークがあれば、そのピーク周期が卓越周期である確度が高い。
- ・ ある測点周辺での地盤の卓越周期が判明している場合には、それらも参照し、上記の方法をもとに最も妥当と思われる周期をその地盤の卓越周期とみなす。

飯田ら¹⁰⁾は、常時微動を水平成分及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。地盤構造を洪積地盤、層厚 0m-10m の沖積地盤、層厚 11m-20m の沖積地盤、層厚 21m 以上の沖積地盤の大きく 4 種に分け、各々の地盤上での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に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。そこで、この現象に着目し、図一1 のような新地盤種別判定法を提案している。これは、水平成分の卓越周期の平均値（以下、 $T_{N,E}$ ）

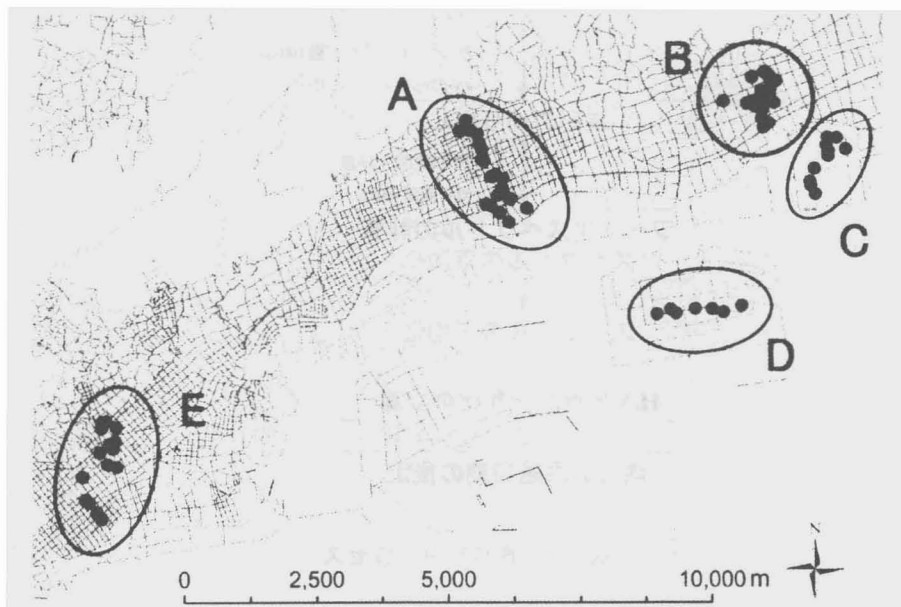
と記す)が 0.22 秒の点から横軸に 45 度の角度を持って引いた直線と、上下成分の卓越周期(以下、 T_V と記す)が 0.27 秒の点から横軸に並行に引いた直線、及び横軸、縦軸に囲まれたゾーンを第一種地盤としている。第二種地盤は、第一種地盤と同様に、 $T_{N,E}$ が 0.24 秒、 T_V が 0.45 秒の点より直線を引き、第一種地盤を除いたゾーンとした。同様に第三種地盤は、 $T_{N,E}$ が 0.47 秒、 T_V が 0.47 秒である。第四種地盤はこれら以外のゾーンとする。ここで言う第一種地盤とは現在の建築基準法でいう第一種地盤に、第二種及び第三種地盤は現在の第二種地盤に、第四種地盤は現在の第三種地盤に相当する。さらに飯田ら¹⁰⁾は、名古屋地盤において地盤種別判定を行っており、この相関値は 60% 程度の値となっている。



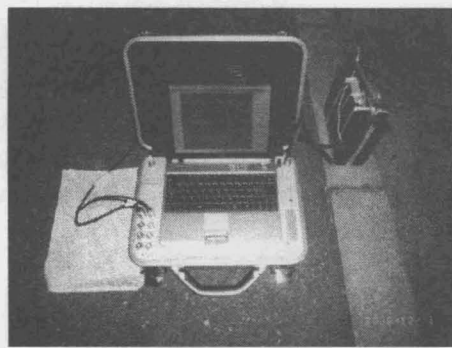
図一1 飯田ら¹⁰⁾の提案する地盤種別判定法

3. 測定及び解析方法

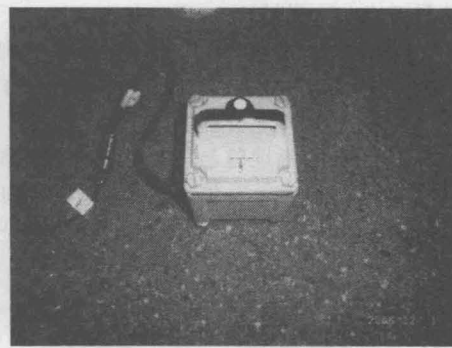
地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」⁷⁾に登録されているボーリング地点のうち図一2 に示す 78 点において常時微動測定を行った。「神戸 JIBANKUN」⁷⁾とは、神戸市が持つボーリングデータ約 6,000 本や地形図、兵庫県南部地震時の被害状況などを収録した地盤情報データベースである。測定点は作業場所の確保や交通振動の影響などを考慮した上で、その影響が少なくなるように決定した。また、交通振動の影響が少なくなるよう、測定は夜間 (20 時から 2 時頃まで) に行った。計測は測定周波数 0.5-18Hz の 3 成分(X,Y,Z)の微動計を用いて 5 分間行った。写真一1 に常時微動測定に使用した機器を、写真一2 に常時微動の測定風景を示す。



図一2 常時微動測定位置



a) 微動観測システム



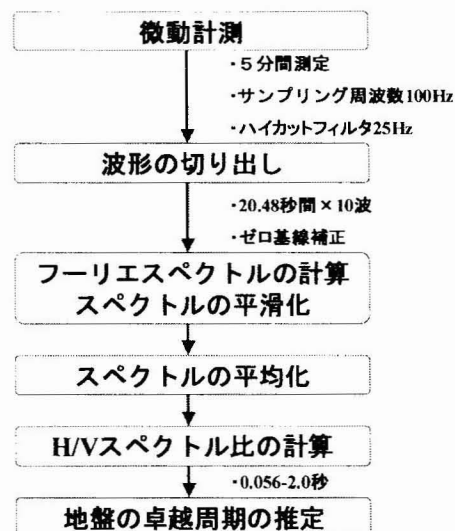
b) 微動計

写真—1 使用した機器

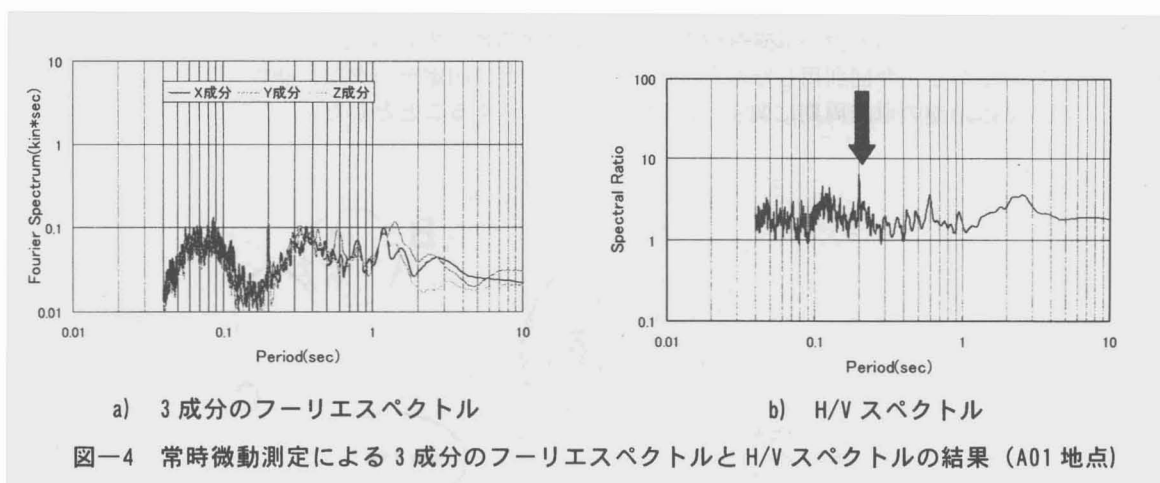


写真—2 測定風景

図—3 に波形処理プロセスを示す。常時微動測定結果から得られた 5 分間の連続波形データから安定している 20.48 秒の波形データを 10 区間切り出してゼロ基線補正を行った。その切り出した 10 波の波形ごとにフーリエスペクトルを 3 成分(X,Y,Z)それぞれについて計算し、Blackman Window により平滑化処理を施した後に、10 波を平均化した。さらに、X 成分と Y 成分の二乗和の平方根と上下成分のフーリエスペクトルの比を計算することにより H/V スペクトルを算出し、H/V スペクトルが最も卓越した周期を地盤の卓越周期（以下、 T_m と記す）とした。ここで、微動計の測定周波数は 0.5～18Hz であることから、周期が 0.056 秒から 2 秒の範囲を対象とする。各測定点において算出した 3 成分のフーリエスペクトルと H/V スペクトルの結果の一例（A01 地点）を図—4 に示す。



図—3 波形処理プロセス



図一3a)より、A01 地点においては、3成分のフーリエスペクトルはほぼ同じような形状を示していることがわかる。また、図一3b)から、最も卓越している周期を読み取ると0.200秒であることがわかる。よって、A01 地点における地盤の卓越周期 T_m は0.200秒と推定できる。同様の手法を用いて、すべての測定点において常時微動測定結果より推定した地盤の卓越周期 T_m を表一2に示す。表一2より、0.059秒から1.950秒の地盤の卓越周期が得られた。またその平均は0.72秒であった。

表一2 常時微動測定結果より推定した地盤の卓越周期 T_m

測点名	$T_m(s)$	測点名(s)	$T_m(s)$	測点名	$T_m(s)$	測点名	$T_m(s)$
A01	0.200	B02	0.307	C02	1.905	D10	1.821
A02	1.092	B03	0.440	C03	0.901	D11	0.265
A03	0.119	B04	0.535	C04	1.261	E01	0.171
A04	0.149	B05	0.650	C05	1.050	E02	0.230
A05	0.186	B06	0.543	C06	0.862	E03	0.223
A06	0.106	B07	0.625	C07	0.893	E04	0.172
A07	0.508	B08	0.773	C08	0.890	E05	0.424
A08	0.667	B09	0.788	C09	1.742	E06	0.448
A09	0.637	B10	0.491	C10	0.059	E07	0.377
A10	0.508	B11	0.752	C11	1.605	E08	0.221
A11	0.493	B12	0.515	C12	1.300	E09	0.417
A12	0.694	B13	0.780	D01	1.950	E10	0.513
A13	0.704	B14	0.496	D02	0.133	E11	0.599
A14	0.571	B15	0.488	D03	1.949	E12	1.742
A15	0.725	B16	0.191	D04	1.950	E13	0.685
A16	0.725	B17	0.485	D05	0.257	E14	0.606
A17	0.730	B18	0.581	D06	1.950	E15	0.610
A18	0.712	B19	0.512	D07	0.190	E16	0.602
A19	0.136	B20	0.573	D08	1.949		
B01	0.273	C01	0.855	D09	1.779		

常時微動から推定した地盤の卓越周期 T_m の分布を図一5に示す。図一5よりA地域では海側に移るにつれて卓越周期が長くなっているのがわかる。B、E地域においてもその傾向が見られる。C、D地域はA、B、E地域と比べて長周期となっている。これは、C、D地域は埋め立て地であり、A、B、E地域に比して軟弱地盤であるからだと考えられる。しかし、C、D地域において0.4秒以下の短周期においてH/Vスペクトルが卓越した5点(C10,D2,D5,D7,D11地点)については、妥当な結果であるとは考えにくい。このような結果となった原因として、本研究では、0.056-2.0秒の範囲を対象として地盤の卓越周期を推定したが、この5点で

は 2.0 秒よりも長周期で H/V スペクトルの山が見られることから、実際には地盤の卓越周期は 2.0 秒以上であると考えられる。しかし、今回利用した微動計では 2.0 秒以上の測定データは信頼性が低い。そのため、上述の 5 点に関しては地盤の卓越周期に関する比較対象から除外することとした。

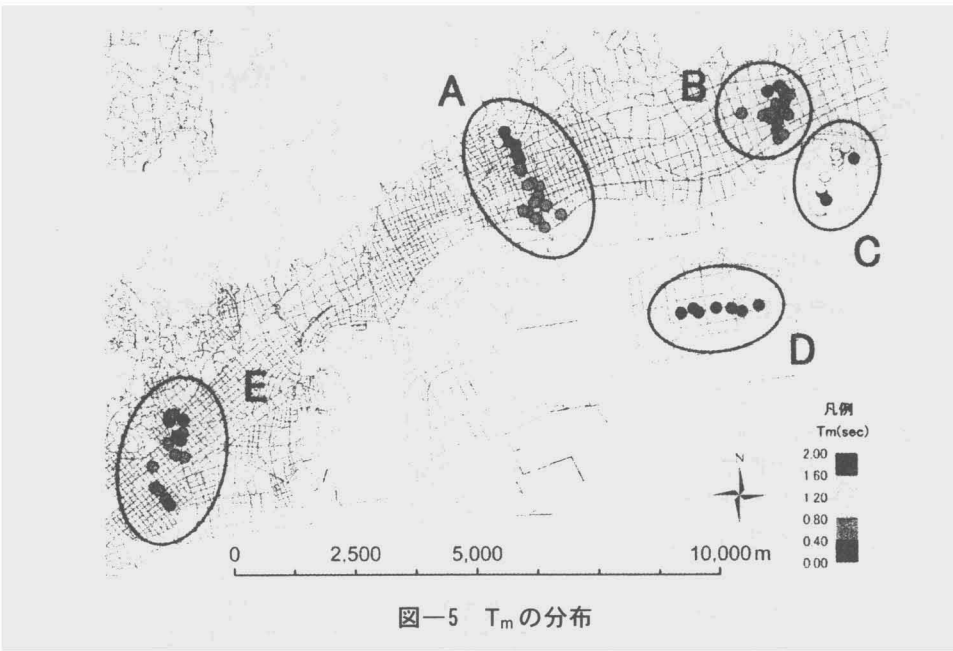


図-5 T_mの分布

4. 地盤種別判定方法の提案

常時微動測定結果より推定した地盤の卓越周期 T_m と算出式を用いて求めた地盤の卓越周期 (以下、 T_g と記す) に基づく地盤種別との対応を検討することにより、常時微動測定結果に基づいて地盤種別判定を定量的に行う方法を提案する。また、飯田ら¹⁰⁾の研究を参考に、常時微動の水平・上下成分の卓越周期 $T_{N,E}$ 、 T_V と地盤種別との関係に着目し、それらに基づく地盤種別判定方法も提案する。

まず、「神戸 JIBANKUN」⁷⁾に登録されているボーリングデータをもとに、沖村ら³⁾の N 値から S 波速度 (以下、 V_s と記す) を換算するための回帰式を用いて算出した V_s と、地表から工学的基盤面までの各層の層厚 (以下、 H と記す) を用いて、式(1)より各測定点における地盤の卓越周期 T_g を算出した。沖村ら¹⁴⁾が求めた各地層の回帰式を表-3 に示す。また、 T_g を用いて、各測定点における地盤種別を木造建造物の耐震設計における規準(表-4)⁶⁾に基づいて判定した。

表-3 N 値から V_s を換算するための回帰式¹¹⁾

地層名	回帰式
A _c 沖積粘性土	$V_s=87.4N^{0.372}$
A _s 沖積砂質土	$V_s=106.0N^{0.231}$
A _g 沖積礫質土	$V_s=102.8N^{0.205}$
D _c 段丘粘性土	$V_s=101.7N^{0.362}$
D _s 段丘砂質土	$V_s=175.2N^{0.171}$
D _g 段丘礫質土	$V_s=241.0N^{0.099}$
M _{a13} 沖積粘性土	$V_s=149.6N^{0.157}$
M _{a12} 洪積粘性土	$V_s=182.7N^{0.142}$
F 盛土・埋土	$V_s=140.6N^{0.129}$

表-4 地盤周期と地盤種別の対応⁶⁾

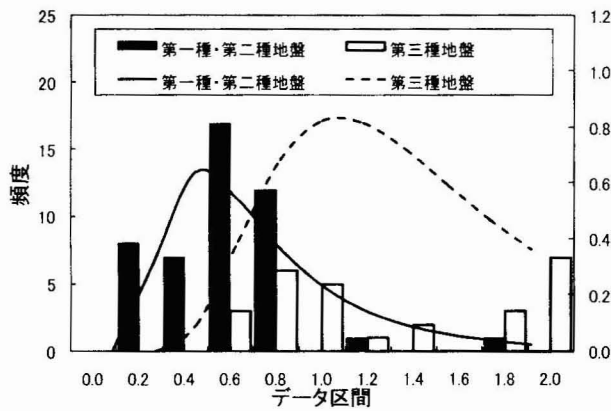
地盤種別	地盤周期 T_g [s]
第一種	$T_g \leq 0.2$
第二種	$0.2 < T_g \leq 0.75$
第三種	$0.75 < T_g$

$$T_g = \left\{ 4 \left(\sum_{i=1}^n H_i \right)^2 \right\} / \left(\sum_{i=1}^n V_{si} H_i \right) \quad (1)$$

(1) 常時微動測定から推定した地盤の卓越周期に基づく手法

第一種及び第二種地盤と第三種地盤のそれぞれについて、 T_m のヒストグラムと確率密度関数を図-6 に示す。第一種及び第二種地盤での T_m の平均は 0.42 秒、第三種地盤での T_m の平均は 1.08 秒であり、 T_m の平均は第一種及び第二種地盤よりも第三種地盤の方が長くなった。また、マハラノビスの距離による判別分析¹²⁾

を行った。これは、両者の誤判定率が等しくなるようにしきい値を求める方法である¹²⁾。その結果、第一種及び第二種地盤と第三種地盤のしきい値は 0.71 秒となった。このしきい値に基づく地盤種別の結果を表一5に示す。表一5より、全体の 82.2%を正しく判別することができており、この手法により良好な地盤種別判定を行うことができると考えられる。

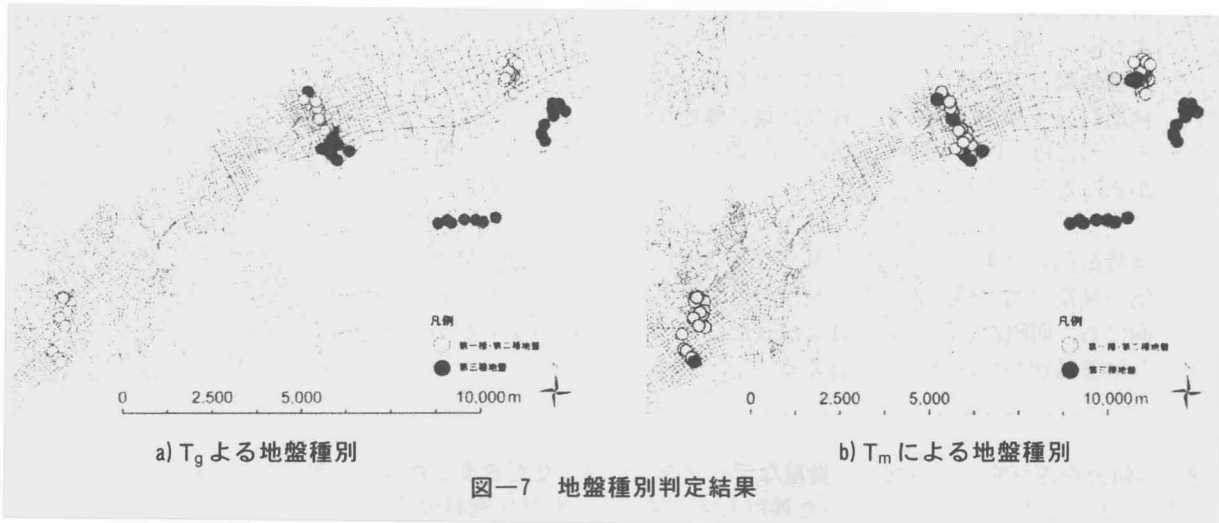


図一6 T_m のヒストグラムと確率密度関数の比較

表一5 判別の結果

		T_m による種別	
		I・II	III
T_g による種別	I・II	39	7
	III	6	21

しかし、 T_g による地盤種別判定で第三種地盤と判定された点のうち 22.2%を T_m による地盤種別判定では第一種及び第二種地盤であると誤判定している。そこで、今回の手法で誤判定となった地点について原因を検討した。図一7より誤判定となった地点については A 地域の南部及び B 地域の中央部に多く位置していることから、地域的な要因があると考えられる。A 地点の南部は、鉄道、国道、高速道路が隣接している地域であり、これらによる影響が考えられる。一方、B 地域の中央部ではどの地点の T_m もしきい値付近の値となっており、第二種地盤と第三種地盤の境界であると考えられる。このような場合、 T_m のみに基づいて地盤種別判定を行うことは困難であると言え、何らかの情報の総合判断をする必要があると考えられる。これについては今後更なる検討が必要である。

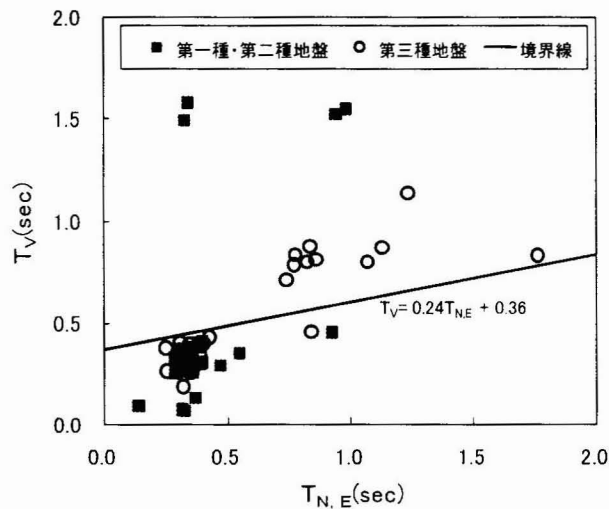


図一7 地盤種別判定結果

(2) 常時微動の水平・上下成分に基づく手法

常時微動の測定結果より上下成分の卓越周期 T_V 及び水平成分の卓越周期の平均値 $T_{N,E}$ を求めた。ここで、飯田ら¹⁰⁾の研究を参考に、 $T_{N,E}$ は X 成分の卓越周期と Y 成分の卓越周期の平均値とした。 T_V 及び $T_{N,E}$ の分布を図一8に示す。また、線形判別関数による判別分析¹²⁾より求めた第一種及び第二種地盤と第三種地盤の境界線を図一8に重ねて示す。境界線よりも下側が第一種及び第二種地盤、上側が第三種地盤と判定できる。この境界線による地盤種別の結果を表一6に示す。正しく判別できたのは全体の 66.7%であった。また、第

一種及び第二種地盤と第三種地盤における T_V 及び $T_{N,E}$ の分布傾向を比較しても、両者は混在しており、明瞭な違いは見られない。よって、 T_V 及び $T_{N,E}$ のみに基づいて地盤種別を判定することは難しいと言える。



図一8 T_V 及び $T_{N,E}$ の分布と境界線

表一6 判別の結果

		T_V 及び $T_{N,E}$ による種別	
		I・II	III
T_g による種別	I・II	42	4
	III	22	10

5. 結論

本研究では、常時微動を活用した地盤種別判定方法を提案することを目的とした。具体的には、まず神戸市域の78点において常時微動測定を行い、その結果から地盤の卓越周期を推定した。つぎに、各測定点において算定式を用いて地盤の卓越周期を算出し、地盤種別を判定した。その結果と常時微動測定結果より推定した地盤の卓越周期を比較検討することにより、地盤種別を定量的に行う方法を提案した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 常時微動測定結果から推定した地盤の卓越周期に基づく手法では、全体の82.2%が正しく判別できた。よって、全体として良く判別できていると言える。しかし、交通振動が大きな地域や、第一種及び第二種地盤と第三種地盤の境界付近となる地域では、正しく判別することができなかった。また、第三種地盤のうち22.2%を第一種及び第二種地盤であると誤判定している。今後さらにその精度を良くするためには、地盤の卓越周期のみにより判断するのではなく、何らかの情報との総合判断をする必要があると考えられる。
- 2) 常時微動の水平・上下成分に基づく手法では、正しく判別できたのは全体の66.7%であった。また、第一種及び第二種地盤と第三種地盤における、常時微動の上下成分及び水平成分の卓越周期の分布傾向にも、明瞭な違いは見られなかった。よって、常時微動の水平・上下成分の卓越周期のみに基づいた地盤種別判定は難しいと言える。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、貴重なデータをご提供いただきました神戸の地盤・減災研究会の長谷川信介氏、現地調査に同行していただいた神戸大学大学院自然科学研究科の堀内雅宏氏に心より感謝致します。また、本研究は都市安全研究センター研究プロジェクト「都市自然災害のハザードマップ作成とその活用に関する研究」の一環として行った。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震災害調査速報，p.5，1995.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編一4 木造建築物 建築基礎構造，日本建築学会，pp.111-117，1998.
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課：木造住宅の耐震診断と補強方法，日本建築防災協会，364p，2004.

- 4) 国土交通省住宅局建築指導課，建築技術者試験研究会：基本建築関係法令集〔法令編〕平成 18 年度版，霞ヶ関出版社，pp.569-572, 2006.
- 5) 日本建築学会：建築士のためのテキスト 小規模建築物を対象とした地盤・基礎，丸善，pp.1-26, 2003.
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課，日本建築主事会議，日本建築センター：5.5 地震力，2001 年度版建築物の構造関係技術基準解説書，日本建築センター，pp.207-217, 2001.
- 7) 神戸市役所，建設工学研究所：神戸市地盤調査報告書，第 7 章 神戸地盤の地層構成，pp.7(1)-7(26), 1998.
- 8) 大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄巧：常時微動の水平動を上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良と適用，土木学会論文集，No.489, pp.251-260, 1994.
- 9) 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.
- 10) 飯田汲事，正木和明，谷口仁士：地盤の振動特性と地盤種別判定法，第 15 回自然科学総合シンポジウム，pp.253-254, 1978.
- 11) 沖村孝，佐藤忠信，南部光広，若林亮，岸本英明：地盤情報データベースを活用した神戸地域地震動解析，土木学会論文集，No.701, pp.121-134, 2002.
- 12) 有馬哲，石村貞夫：多変量解析のはなし，第 4 章 判別分析，東京図書，pp.127-166, 1987.

筆者：1) 沖村孝，都市安全研究センター，教授；2) 鳥居宣之，都市安全研究センター，助手；3) 堀江啓，人と防災未来センター；4) 余川千咲，神戸大学工学部，学生

THE APPLICATION OF MICROTREMOR MEASUREMENT TO THE GROUND CLASSIFICATION

Takashi Okimura
Nobuyuki Torii
Kei Horie
Chisaki Yokawa

Abstract

In earthquake-proof check, wooden houses, which stand at soft ground, need 1.5 times as strong proof strength as at normal ground. Therefore, it is important to classify the type of ground quantitatively. In this report, we aim to propose the method of the ground classification based on the result of the microtremor measurement.

First, the microtremor measurements carried out in 78 points in urban area of Kobe city in order to estimate the predominant period of ground (T_g). Next, the type of ground was classified by the predominant period of ground (T_m), which was obtained by theoretical formula. Then, we proposed the method of ground classification using the result of discriminant analysis of T_g and T_m . As result of using this method, the type of ground could classify correctly in about 80% of the investigation points.