

(株) 帝国建設コンサルタント 正会員 穂 峰生
同上 正会員 宮下 高昭
岐阜大学 正会員 杉戸 真太

1. はじめに

常時微動測定は、地盤の振動特性を求めるために手軽に測定が行えることから頻繁に利用されている。

従来、常時微動は成層地盤におけるSH波の重複反射として説明づけられていた。しかしながら、その後、常時微動は短周期微動の振動源が主に地表の産業活動に起因することなどから表面波、特にレーリー波が優勢に含まれているとの考えが一般化しつつある。

近年、レーリー波の水平動/鉛直動の振幅比が地盤固有の値であるとのことから、常時微動のそれから地盤の卓越周期を推定する方法¹⁾が盛んに用いられている。しかし、常時微動はレーリー波のみで構成される訳でない。むしろ、常時微動の水平動にはレーリー波よりもラブ波が多く含まれているとの報告²⁾がある。従って、常時微動の水平動/鉛直動の振幅比から地盤の卓越周期を推定する方法では、水平動へのラブ波の寄与を無視していること、さらに、どのような地盤に適合するかなどの適用限界が必ずしも明確ではない。しかし、地盤のコントラストが大きい地層境界が存在する場合、常時微動をSH波、レーリー波、ラブ波のいずれとして取り扱っても三者から求まる卓越周期と地盤の卓越周期とがほぼ一致する³⁾。そのため、常時微動は今日まで地盤の卓越周期を求めるために盛んに利用されている。しかし、常時微動はそのような地盤のみで測定されるわけではない。したがって、常時微動測定結果から地盤の卓越周期を推定する場合には、常時微動の波動的性質、得られた卓越周期の妥当性のある程度明確にする必要がある。

そこで、著者らは岐阜市内において、ボーリング孔内に深度を変えて4箇所微動計を設置し、常時微動の鉛直アレー観測を実施した。本論文では短周期領域の波動的性質について一考し、地盤の卓越周期の評価についても検討する。

2. 常時微動の鉛直アレー観測

(1) 調査値の地形・地質

調査地は濃尾平野の北端に位置し、伊自良川が形成した沖積平野に相当する。この沖積平野は主に調査地の南方～東方に広がり、長良川扇状地に漸移する。また、沖積平野の北端、調査地の約1km北には標高300m以下の山稜が東西方向に連なっている。調査地周辺の沖積平野は現在、農耕地として土地利用されている。

調査地の地質は中生層の砂岩、チャートを基盤とし扇状地堆積物、氾濫原堆積物、三角州堆積物が累重する河川起源の堆積物に覆われる。扇状地堆積物と三角州堆積物は、水平方向への連続性が良くかなりの広範囲にわたり分布している。特に、GL-40m以深に分布する扇状地堆積物は非常に均一で密実な地層で、調査地域では耐震上の基盤(工学的基盤)として扱われている。一方、氾濫原堆積物は粘土、砂、砂礫の互層からなり、層相変化が激しい地層である。

図1および表1に鉛直アレー観測を実施したボーリング地点の地層構成と弾性波速度値(S波速度値、P波速度値)を示す。ただし、弾性波速度値は鉛直アレー観測孔から30m程度離れたボーリング地点で実施したサスペンション式PS検層から得られた値である。また、基盤岩の深度および弾性波速度値は、地形状況と周辺地域の既存資料から推定した。

Vertical Array Observation of Microtremors in Borehole

Haze Mineo, Miyasita Takaaki (Teikoku Engineering Consultants, Inc)

Sugito Masata (Gifu University)

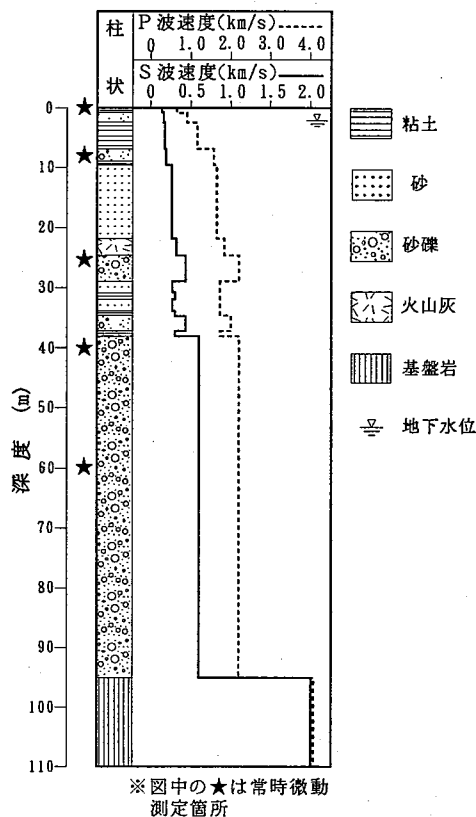


図1. 鉛直アレー観測孔の地層構成

表1. 地層モデル

地層	H (m)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	ρ (g/cm ³)
粘性土	0.8	0.14	0.63	1.5
砂礫	1.55	0.16	0.90	2.1
粘性土	4.5	0.17	1.17	2.0
砂礫	2.0	0.19	1.59	2.1
粘性土	0.75	0.19	1.59	2.0
砂質土	10.4	0.26	1.65	1.872
軽石混じり砂	1.75	0.26	1.65	1.643
火山灰土	2.8	0.32	1.83	1.85
砂礫	4.35	0.43	2.20	2.1
砂質土	1.9	0.27	1.72	1.953
粘性土	1.1	0.30	1.73	1.75
砂質土	1.9	0.27	1.72	1.953
粘性土	0.8	0.30	1.73	1.75
砂礫	2.6	0.44	2.01	2.1
粘性土	0.8	0.30	1.73	1.75
砂礫	57.0	0.60	2.16	2.1
基盤岩	—	2.00	4.00	2.5

H : 層厚
Vs : S波速度
Vp : P波速度
 ρ : 密度

(2) 常時微動の測定方法

常時微動測定は地表および孔内用とも、3成分(水平2成分、鉛直1成分)の固有周期10秒のサーボ型速度計(株式会社東京測振)を用いた。測定は地表と孔内で同時に実施した。ただし、埋設型の孔内用微動計を用いたため、GL-8m, GL-25m, GL-40m, GL-60mの4箇所(図1の★印)は、観測日が異なる。

測定は各観測日とも、雑振動の少ない夜間(20時~22時)に、500Hzのサンプリングで60分~90分間実施した。解析には得られた記録のうち波形振幅が比較的安定している5分間を選出し、フーリエ解析を行った。フーリエ解析は、1回の解析データ数が4096個で各解析区間のデータはその前後でオーバーラップさせた。フーリエスペクトルは、その単純加算平均としParzenウィンドウで平滑化した。

3. 測定結果

(1) フーリエスペクトル

観測した常時微動のフーリエスペクトルを図2に示す。同図には地表と孔内の同時測定で得られたフーリエスペクトルを対にして示してある。フーリエスペクトルは、地表と孔内ともほぼ同じスペクトル形状を示すが、水平動と鉛直動とではスペクトル形状が異なる。水平動はEW方向に周期0.35s付近での卓越が見られるが、NS, EW方向とも概ね周期0.5~0.6sと周期3秒以上で卓越する。一方、鉛直動は概ね周期0.2~0.3sと周期3s以上で卓越するが、水平動と比較すると全体的になだらかなスペクトル形状である。

また、孔内のフーリエスペクトル値は、浅層部ほど地表面のフーリエスペクトル値に近づく傾向が見られる。水平動の周期0.3~1.0s付近は徐々に地表面のフーリエスペクトル値に近づき、GL-8mで地表面とほぼ同じフーリエスペクトル値を持つ。しかし、周期0.1~0.3sはその傾向が顕著に見られず僅かに地表面のフーリエスペクトル値に近づくのみである。また、鉛直動の周期0.1~1.0s付近は水平動の周期0.3~1.0s付近と同様に徐々に地表面のフーリエスペクトル値に近づき、GL-8mで地表面とほぼ同じフーリエスペクトル値を持つ。

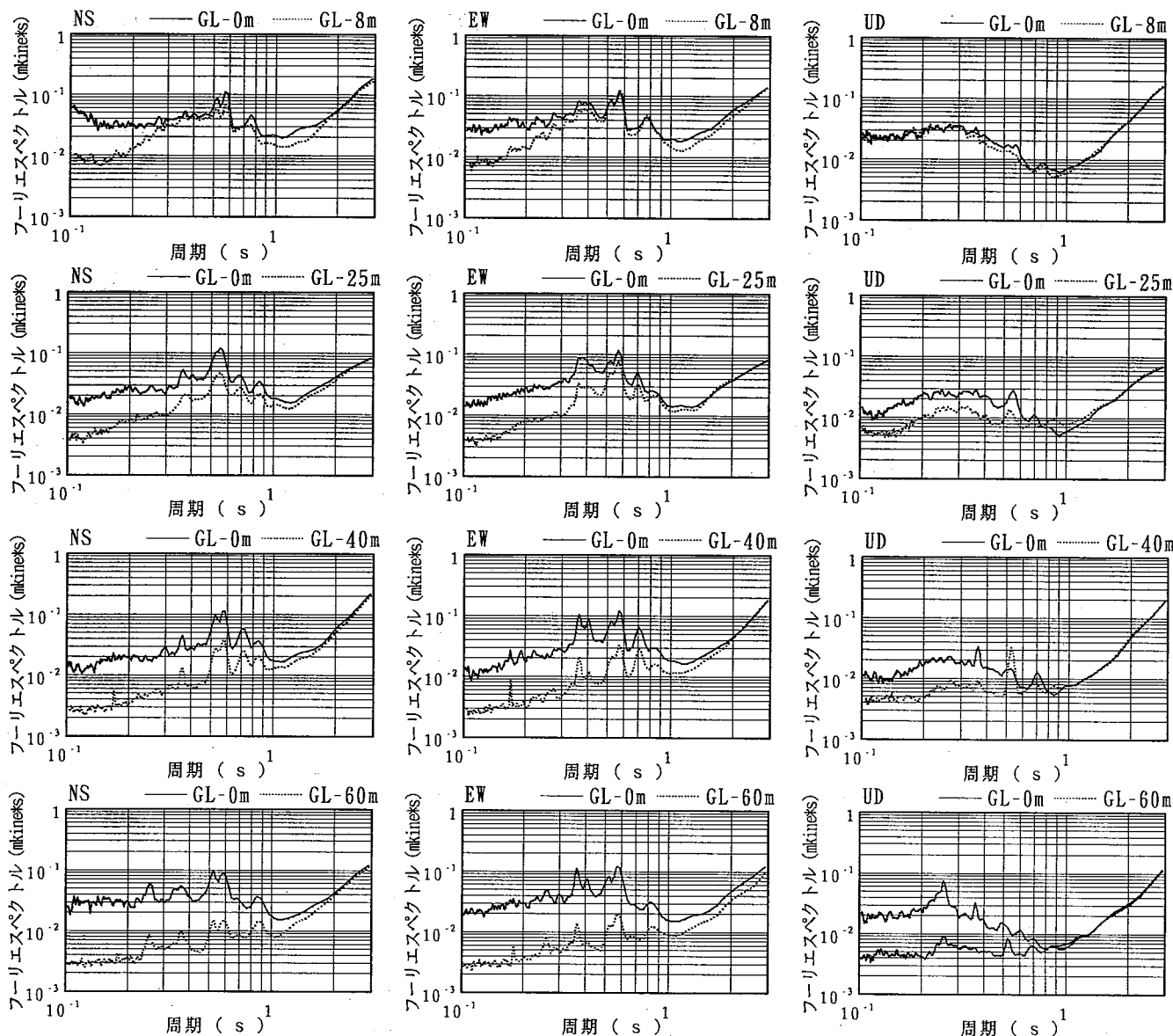


図2. 地表およびボーリング孔内で測定した常時微動のフーリエスペクトル

(2) 粒子軌跡

常時微動の5秒間の粒子軌跡を図3に示す。ただし、粒子軌跡には観測波形にフィルター処理を行なって、水平動のスペクトル値が大きい周期帯(0.4~0.65s)と鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯(0.2~0.4s)に分解した。また、粒子軌跡は深度毎に座標軸のスケールが異なる。

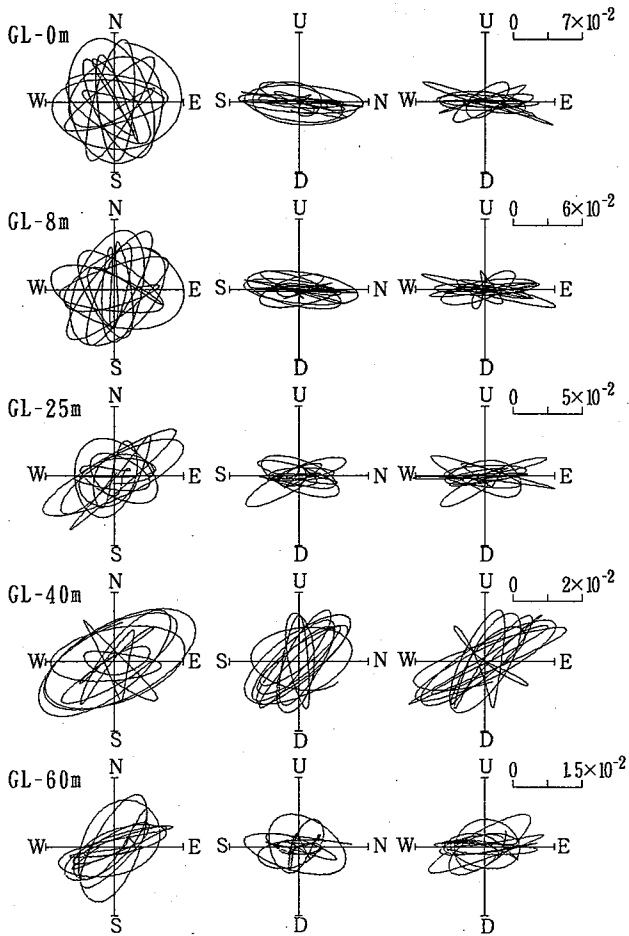
水平動のスペクトル値が大きい周期帯での粒子軌跡(図3の左側)は、地表面と孔内が概ね同様な傾向を示す。水平面内では振動する動きと回転する動きが顕著に観察され、鉛直面内ではGL-40mを除いて水平方向に振動する動きと水平方向に長軸を持つ楕円形の動きが観察される。一方、鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯での粒子軌跡(図3の右側)も地表面と孔内が概ね同様な傾向を示す。水平面内では振動する動きと回転する動きが顕著に観察される。しかしながら、鉛直面内では不規則に振動する動きの他に鉛直方向に長軸を持つ楕円形の動きが顕著に観察される。

粒子軌跡は水平動のスペクトル値が大きい周期帯と鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯とでは、明らかに鉛直面内での動きが異なる。

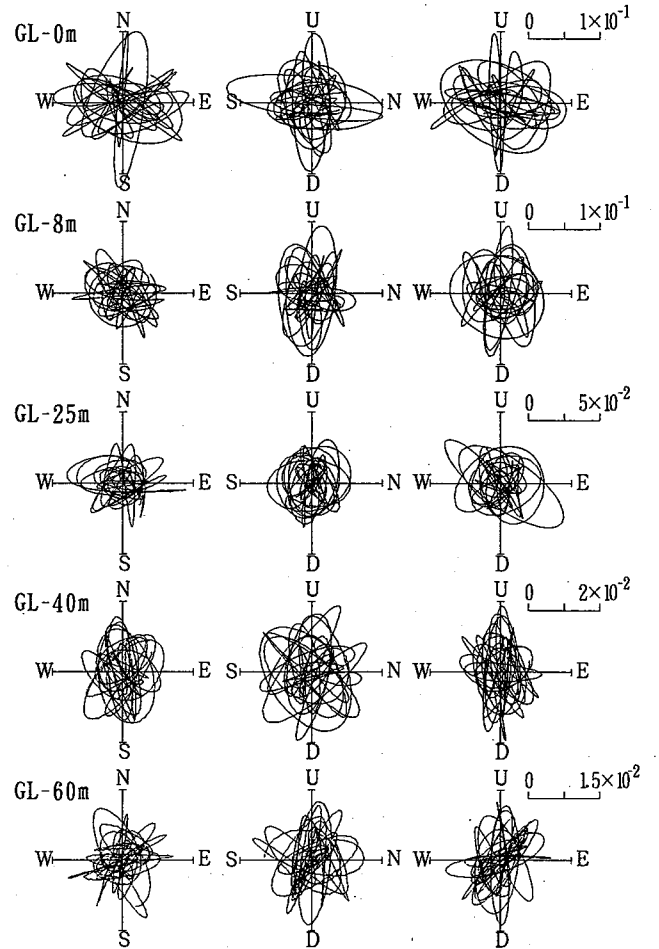
(3) 位相特性

水平動のスペクトル値が大きい周期帯の波は、フィルター処理を行った波形を観察すると水平動が地表面と孔内でほぼ同位相で振動している。鉛直動は位相の調和性がやや悪く、地表面とGL-25m, GL-60mで部分的に位相が逆転する。一方、鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯の波は、水平動が地表面とGL-8m, GL-25m

水平動のスペクトル値が大きい周期帯(0.4~0.65s)



鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯(0.2~0.4s)



※スケールの単位はm/kine

図3. 各深度毎の速度波形の粒子軌跡

ではほぼ同位相で振動するが、GL-40m, GL-60mとでは調和性が悪く部分的に位相が逆転する。また、地表面の鉛直動はGL-40m以浅とほぼ同位相で振動するが、GL-60mとでは位相の調和性が悪い。

全体的な傾向として、観測された常時微動は水平動のスペクトル値が大きい周期帯の方が鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯より同位相で振動している。

(4) 周期別振幅比

3成分の周期別振幅分布を図4に示す。同図は周期別に孔内のフーリエスペクトルを地表面のフーリエスペクトルで正規化し、深度毎の振幅比の変化を示したものである。

各周期の波は振幅比が3成分とも、地表面で最大になる傾向が見られる。周期0.7s以上の波は深度増加に伴う振幅比の変化が小さく、概ね同振幅比であるかまたは徐々に振幅比が小さくなる。一方、周期0.7s以下の波は深度増加に伴い急激に振幅比が小さくなる。特に短周期の波ほどその傾向が顕著で、周期0.5~0.6s以下の波は、GL-40mで振幅比0.5以下になる。

4. 考察

(1) 常時微動の波動的性質

常時微動は現在までの研究により一般的に表面波(レーリー波, ラブ波)が主体であると考えられている。

図4に示した周期別振幅比から、表層地盤内で大きい振幅値を持ち短周期の波ほど深度の増加とともに急激に振幅が小さくなる表面波的な性質が見られた。調査地盤が複雑であるため、必ずしも表面波の地中振幅比の理論値が常時微動の振幅比と同じ変化傾向を示すとは限らない。しかしながら、水平動スペクトルの大

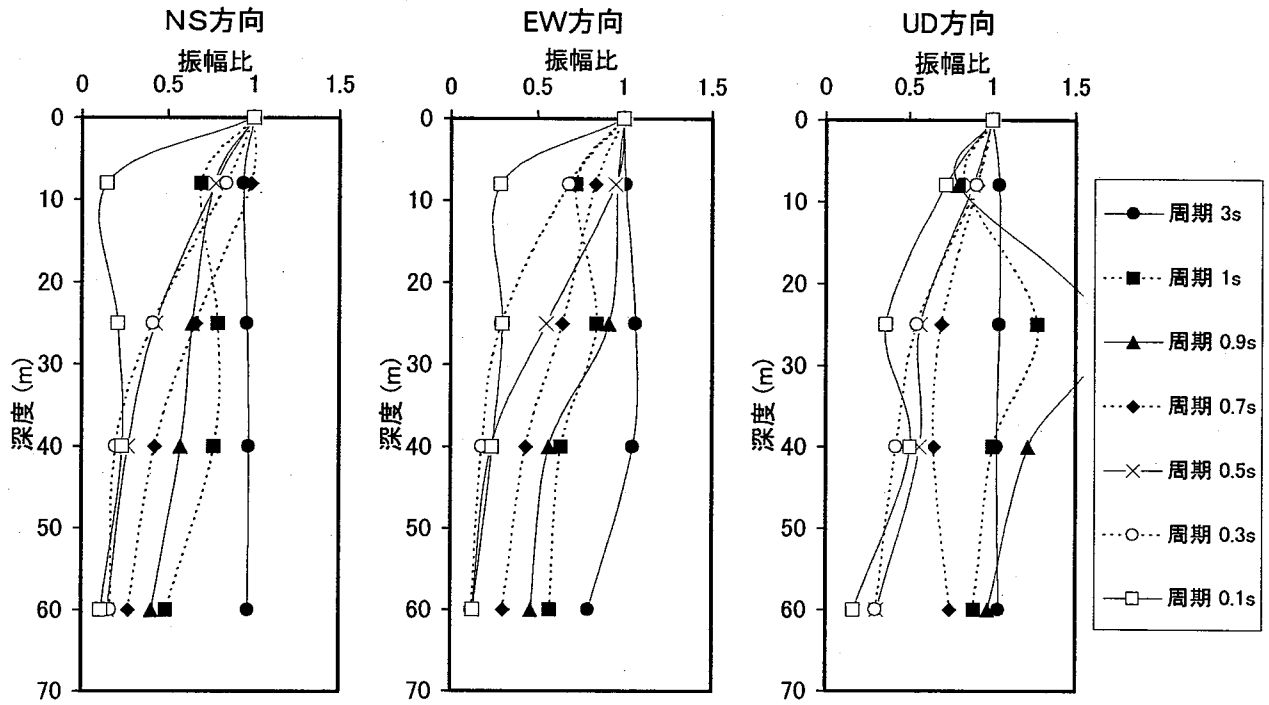


図4. 3成分の周期別振幅分布図

きい周期帯と鉛直動スペクトルが大きい周期帯の波は、地表と地中でほぼ同位相で振動し、鉛直真下から入射したと仮定した顕著な位相差は認められなかった。やはり常時微動は、従来の研究でまとめられているように表面波が優勢であると考えられる。

常時微動がレーリー波とラブ波で構成されるならば、水平動にはラブ波とレーリー波が、鉛直動にはレーリー波が含まれているはずである。分散性を有するラブ波とレーリー波は、理論的に群速度極小値の周期に対応する成分波が大きい振幅で伝播することが知られている。調査地の速度構造から算出したラブ波とレーリー波の理論分散曲線を図5に示す。ラブ波とレーリー波の理論分散曲線には顕著な極小値が存在しないが、調査地のラブ波は周期0.65sの波が大きい振幅で伝播し、レーリー波は周期0.25sと周期0.65sの波が大きい振幅で伝播することになる。観測した常時微動は、水平動の卓越周期がラブ波分散曲線の極小値の周期に概ね一致し、一方、鉛直動の卓越周期はレーリー波分散曲線の極小値の周期に一致している。

さらに、常時微動は水平動のスペクトル値が大きい周期帯と鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯とで、鉛直面内での粒子軌跡が明らかに異なっている。レーリー波は周期により粒子軌跡が変化するため一概には言い難いが、前者の周期帯の粒子軌跡は、鉛直面内で水平方向に振動および水平方向に長軸を持つ楕円形の動きを示し、ラブ波の粒子軌跡と比較的良く似ている。一方、後者の周期帯の粒子軌跡は、鉛直面内で鉛直

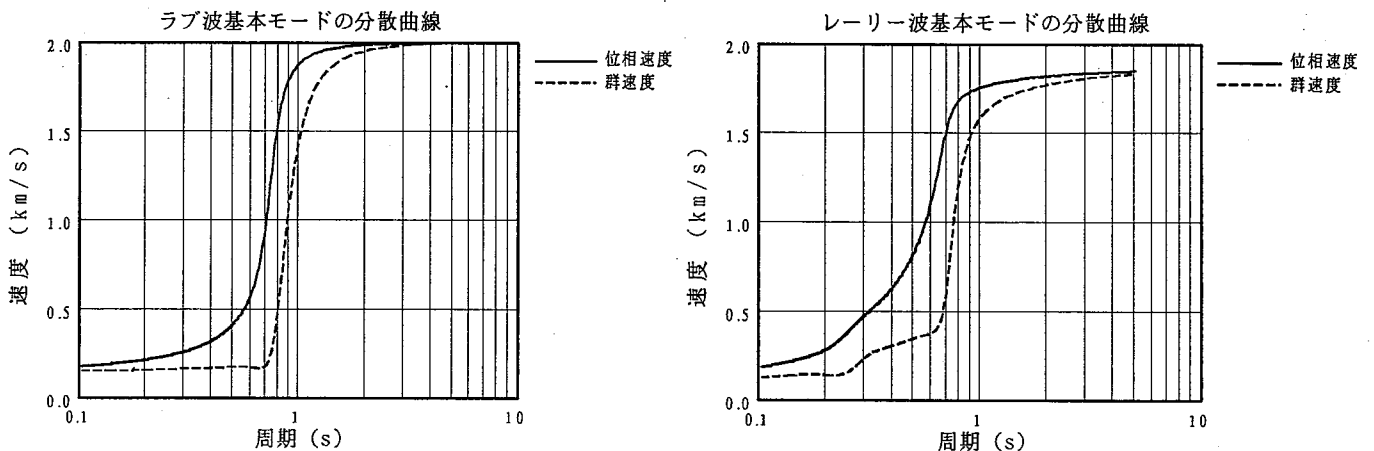


図5. ラブ波とレーリー波の理論分散曲線

方向に長軸を持つ楕円形の動きが見られ、レーリー波の粒子軌跡と比較的良好に似ている。これらの特性から、水平動へのラブ波とレーリー波の寄与は周期によって異なり、水平動スペクトル値の大きい周期帯の波はラブ波が優勢で、鉛直動スペクトル値が大きい周期帯の波はレーリー波が優勢に含まれていると考えられる。しかし、その妥当性を見極めるには、観測例の蓄積および微動アレー観測により水平動へのラブ波とレーリー波の寄与率を算出し、常時微動の卓越周期との関係を明らかにすることが課題になると思われる。

(2) 地盤の卓越周期

常時微動の水平動/鉛直動の振幅比から地盤の卓越周期を推定する方法が盛んに用いられている。しかし、常時微動の水平動には、必ずしもレーリー波が優勢に含まれているとは限らない。周期帯によっては本研究結果のようにラブ波が優勢に含まれていることも考えられる。

ラブ波の実質はSH波で、それが表層地盤内でトラップされ反射を繰り返しつつ表層地盤内を伝播していると解釈されている⁴⁾。従って、水平動のスペクトル値が大きい周期帯の波にラブ波が優勢に含まれているならば、常時微動の水平動の卓越周期に関しては、SH波の重複反射論でも十分に説明づけられる。図6に地表面で観測した常時微動の水平動スペクトル(4回の単純加算平均)と水平動/鉛直動スペクトル比(4回の単純加算平均)および工学的基盤(GL-40m)を基準としたSH波の重複反射論で求まる伝達関数を示したが、三者の卓越周期(0.5~0.6s)は概ね一致している。

常時微動の水平動の卓越周期と水平動/鉛直動の振幅比の卓越周期とが概ね一致した場合には、常時微動をラブ波またはレーリー波と考えてもその周期が地盤の卓越周期を表している可能性が非常に高い。一方、両者の卓越周期が異なった場合は、コントラストが大トが大きい地層境界が存在せず卓越周期が現れにくい地盤である可能性がある。

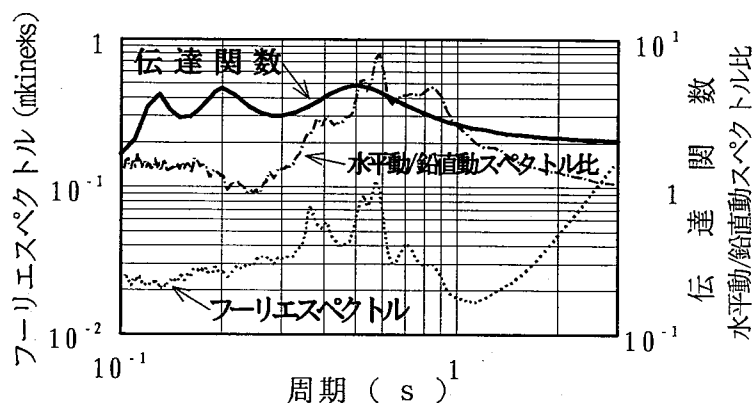


図6. 常時微動の水平動スペクトルと水平動/鉛直動スペクトル比およびSH波の伝達関数

5. 結論

岐阜市内において、ボーリング孔に深度を変えて4箇所微動計を設置し、常時微動の鉛直アレー観測を実施した。その結果、常時微動の基本的特性に関して以下の結論を得た。

- (1) 水平動のスペクトル値が大きい周期帯と鉛直動のスペクトル値が大きい周期帯とでは、粒子軌跡が明らかに異なる。前者がラブ波の動き、後者がレーリー波の動きのように観察される。
- (2) 水平動のスペクトル値が大きい周期帯がラブ波の群速度の極小値を与える周期と、鉛直動スペクトル値が大きい周期帯がレーリー波の群速度の極小値を与える周期と概ね一致する。
- (3) 常時微動にラブ波が優勢に含まれている周期帯では、常時微動の水平動の卓越周期とSH波の重複反射論に基づく伝達関数の卓越周期とが概ね一致した。

参考文献

- 1) 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, pp251~260, 1994
- 2) 山本英和：3成分微動アレー観測によるLove波の位相速度の推定の試み，物理探査第53巻第2号, pp153~166, 2000
- 3) 堀家正則：微動の研究について，地震 第2輯 第46巻, pp343~350, 1993
- 4) 防災工学の地震学：笠原慶一，鹿島主版会，179p, 1988