

ボアホール利用による 微動の鉛直アレー観測とその考察

松川忠司¹・神山 眞²・鈴木順一³

¹正会員 東北工業大学助手 工学部土木工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

²正会員 工博 東北工業大学教授 工学部土木工学科 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

³学生会員 東北工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

ボアホールを利用した最も簡単な常時微動鉛直アレー観測を行い、常時微動特性の予備的な考察を行った。その結果、常時微動のスペクトル特性は、S波理論増幅スペクトルとよく調和し、強震記録の周期特性とも比較的良好に対応することが示された。また常時微動のスペクトル比（地表/地中）および微動記録波形の相互相関関係から、ここでの微動の伝播特性は全体的には下から上へ伝播する特性を持つことが示された。しかし、非定常スペクトルの周期毎の地表と地中の相互相関関係の考察から実体波動的な波動と、表面波動的な波動をもつ周期の波が混在することが示唆された。

Key Words : *microtremor, borehole, vertical array observation, cross correlation, K-NET, spectral ratio, amplification factor*

1. はじめに

微動に関する研究は、古くから理学および工学の分野で精力的になされてきた。著者らは、これまで地盤・構造物系の問題も含め、常時微動の有効利用をはかるべく多くの研究^{1, 2)}を行っており、特に、常時微動特性と地盤構造との関係、常時微動特性と強震動特性の相関などに着目してきた。しかし、これらは基本的には地表面で観測された微動記録に基づいたものであり、より詳しい微動特性を得るためにはなんらかの鉛直アレー観測がより効果的であると考えられる。以上の様な観点から本研究は、ボアホールを利用することによって、最も簡単な常時微動鉛直アレー観測を試みたものであり、このようにして得られた地表、地中の2点同時観測の結果をもとに常時微動特性について予備的な考察をしたものである。

2. 常時微動観測地点および観測方法

常時微動の観測は、平成8年9月21日に宮城県岩沼市北長谷地内（岩沼）で、平成8年9月9日に宮城県玉造郡鳴子町鬼首字八幡原（鳴子/K-NET³⁾観測点：MYG005）の2サイトで行われた。

用いた常時微動計は小型サーボ型速度計付き携帯用振動計（SPC35）で、地表では小型サーボ型速度計（VSE15D）、地中は地中埋設速度型震動感振器（VSE33R）で、これら振動計の総合周期特性は同一であることが保証されている。観測はそれぞれの地点のボアホールを利用し、地表、地中の2点×3成分（水平動NS成分、水平動EW成分、鉛直動UD成分）同時観測で速度振動について時間を変えて数回、慎重に行なわれた。

3. 解析結果および考察

（1）岩沼サイトでの常時微動特性

まず、岩沼サイトでの解析結果について述べる。図-1に岩沼サイトのボーリング柱状図を示す。この地点は、丘陵地と市街地（工場地帯、国道等）に挟まれた田園地帯であり、図-1から比較的軟弱な堆積層を有する地盤であることがわかる。

常時微動の観測は、図-1に示すように-15mのボーリング孔を利用し、地表、地中（-15m）の2点×3成分（水平動NS、EW成分、鉛直動UD成分）同時観測、およびその位置から約1m離れた-5mの試験堀ボーリング孔を利用し、地表、地中（-5m）の2点×3成分同時観測をそれぞれペアで慎重に

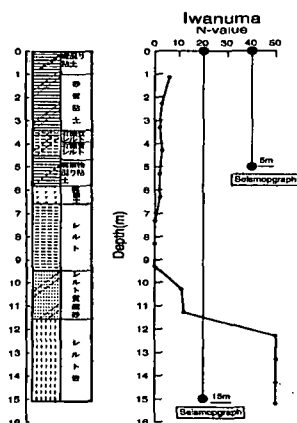


図-1. 観測点の柱状図 (岩沼サイト)

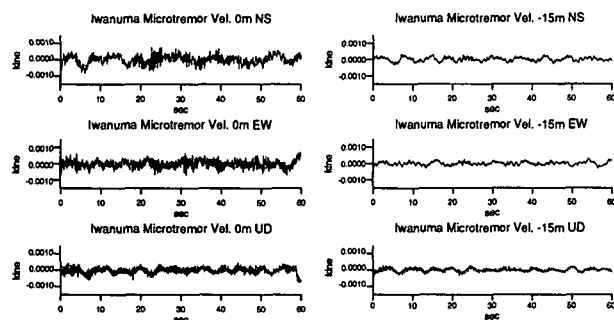


図-2. 常時微動観測波形の例
(岩沼サイト/0mと-15m)

行なった。得られた常時微動の代表的観測波形の例を図-2に示す。

このようにして得られたデジタル記録のうち乱れが少なく最も安定している2,048個(20.48秒間)のデータを地表、地中(-15m)、および地表、地中(-5m)の各6成分を同時刻で数区間抽出した。まず常時微動の周期特性をみるために、抽出したデータから常時微動フーリエスペクトルを求めた。前述のようにこの鉛直アレー観測は各2点同時観測であるが、地表ではオーバーラップして観測を行っているため、その地表スペクトルから地中(-5m)のスペクトルを変換し、見かけ上の3点同時観測になるように設定した。以上のようにして求めた、スペクトルの例を深さ毎に図-3に示す。この図から振幅の違いはあるものの、深さによらずほぼ同様の周期特性を持っていることがわかる。

次に、地盤の増幅特性をみるために、スペクトル比(地表/地中)を算出し、これとS波の重複反射理論による理論増幅スペクトルを重ねてプロットしたのが図-4の左図である。理論増幅スペクトルの解析に用いたS波の速度⁴⁾、Q値⁵⁾はこれまでの経験式より推定したものをを用いた。また、水平動NS成分とEW成分にスペクトルの方向性はあまり見られなかったため、ここではNS、EW成分のベクトル合

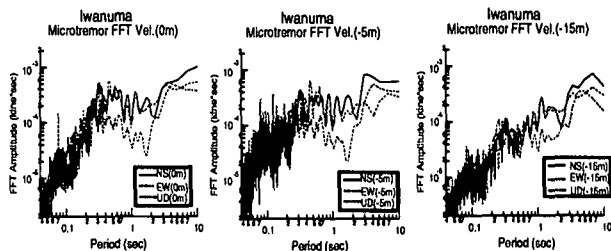


図-3. 深さ毎のフーリエスペクトルの例
(岩沼サイト: 左から0m, -5m, -15m)

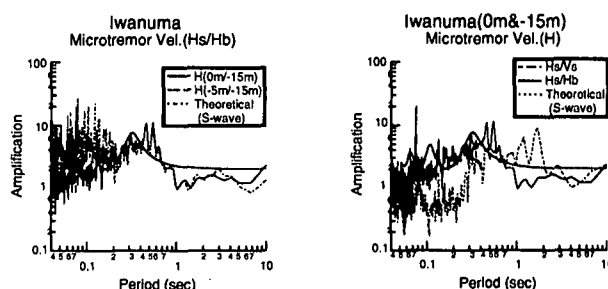


図-4. スペクトル比の例 (岩沼サイト)
(左: H0/H15, H5/H15, 理論 右: H0/UD0, H0/H15, 理論)

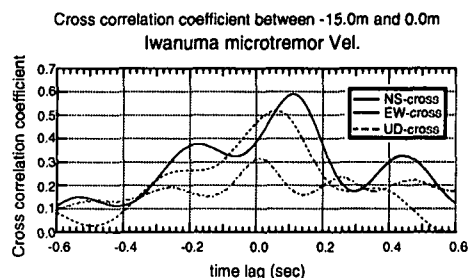


図-5. 常時微動波形の相互相関係数の例 (岩沼サイト)
(-15mと0m: NS, EW, UD成分)

成を求め、水平動スペクトル(H成分)として代表させた。図-4の左図から、地表と地中(-15m)のスペクトル比および、地中(-5m)と地中(-15m)のスペクトル比は両者に差がなく、-5mから地表まではほとんど増幅されることがわかる。また、これらのスペクトル比と理論増幅スペクトルとは比較的良好に調和していることがわかる。

また、H/Vスペクトルと、地表と地中(-15m)のスペクトル比、および理論増幅スペクトルと比較したのが図-4の右図であるが、この図からH/Vスペクトルは約0.3秒以下の短周期部において小さくなっており、地表でのUD成分の短周期部分の影響が大きく作用していることがわかる。

次に、各種相関解析を行った結果について述べる。まず、地表と地中の常時微動の伝播特性を明らかにする目的から、微動記録の各成分ごとの相互相関係数を求めた結果を図-5に示す。これらの図から地

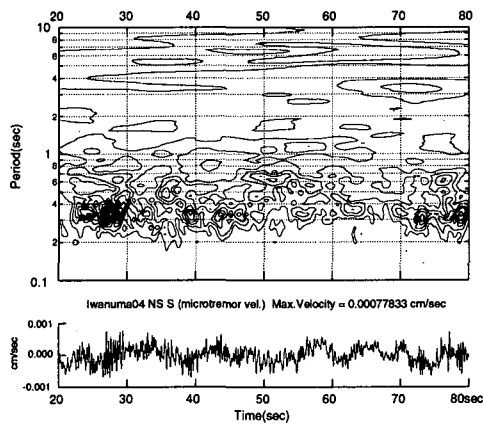


図-6. 非定常スペクトルの例 (岩沼サイト)

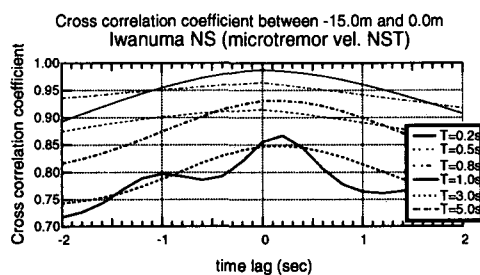


図-7. 非定常スペクトルの周期毎相互相関係数の例 (岩沼サイト/15mと0m: NS成分)

表と地中 (-15m) の水平動成分は方向によって異なるものの、約0.08~0.11秒のタイムラグが確認でき、これから V_s は136~187m/sと推定され、これまでの経験的な値と矛盾しない。

以上、スペクトル比 (地表/地中) および微動記録の相互相関係数の考察から、ここでの微動特性は全体的には下から上へ伝播する実体波的な特性を持つことが示されたが、更に詳しく地表と地中 (-15m) のクロススペクトル、コヒーレンス、フェーズについてみてみると、地表と地中の相関特性は周期毎に複雑な様相を有していることがわかる。特に、フェーズに注目すると、約1秒以上において位相がゼロになる周期、すなわち伝播速度を持たない周期があることが示唆される。そこで、このことを確認するために微動の非定常スペクトル⁶⁾を求め、それぞれの周期毎の地表と地中 (-15m) の相互相関係数を求めた。図-6に地表NS成分の非定常スペクトルのコンターの例を、また図-7に地表と地中 (-15m) の周期毎の相互相関係数の例を示す。図-7は水平動NS成分の代表的周期の例であるが、この図から岩沼サイトでの微動の伝播特性は実体波的な波動と、表面波的な波動をもつ周期の波が混在することが示唆される。

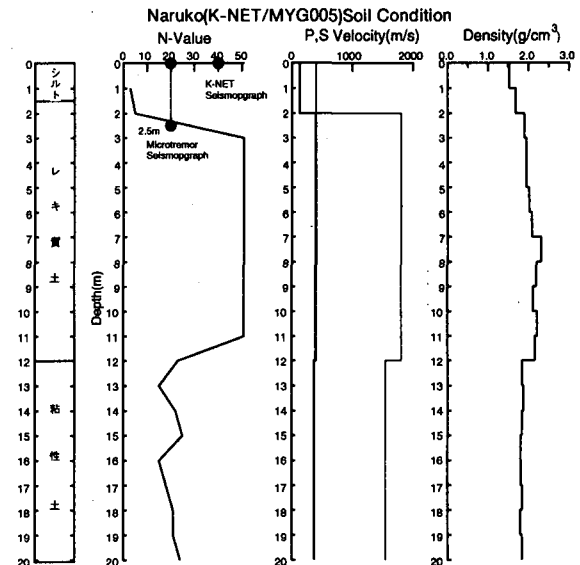


図-8. 観測点の柱状図 (鳴子サイト)

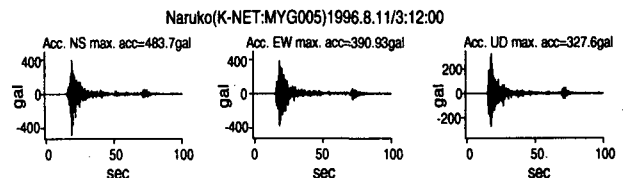


図-9. 宮城県北部地震本震の強震加速度記録の例 (鳴子サイト: K-NET)

(2) 鳴子サイトでの解析結果

次に、鳴子サイトでの解析結果について述べる。図-8に鳴子サイトの観測地点のボーリング柱状図を示す。この地点は、山岳地に囲まれた場所であり、図-8から比較的硬質な地盤であることがわかる。常時微動の観測は、図-8に示すようにハンドオーガーによる-2.5mのボアホールを利用し、地表、地中 (-2.5m) の2点×3成分同時観測を慎重に行なった。なお、鳴子サイトの観測点は、国立防災科学技術研究所により日本全国に25kmメッシュを基本とした1千ヶ所の強震観測点の設置地点のひとつで、平成8年6月より運用開始した直後の平成8年8月に発生した一連の「8.11宮城県北部地震」をタイムリーに記録した地点でもある。従って、この鳴子サイトでは、常時微動特性と強震記録特性を比較、検討するためにインターネットを通じて本震、余震の記録をダウンロードした。紙面の都合で示し得ないが、このようにして収集した強震加速度記録から速度、変位波形を求めこの地震の距離減衰式とそれぞれの応答スペクトルを求めた。図-9に「宮城県北

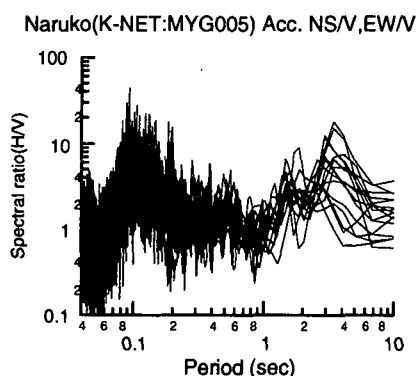


図-10. 主要動部のH/Vスペクトルの重ね書きの例 (K-NET)

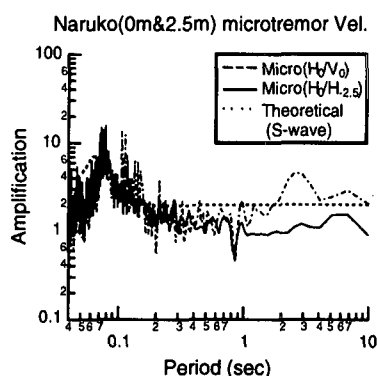


図-11. 微動のスペクトル比の例 (鳴子サイト)

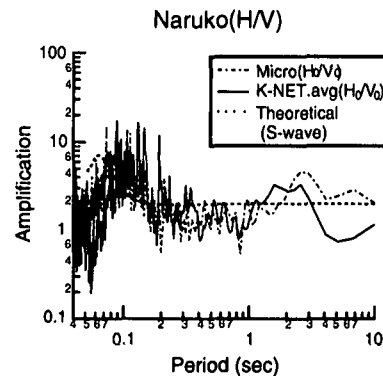


図-12. 微動と強震のスペクトル比の例 (鳴子サイト)

部地震」の8月11日3時12分の本震の強震加速度記録の例を示す。

次に、本震、余震の加速度記録の主要動部のフーリエH/Vスペクトルを求め、これらの結果を重ね書きした例を図-10に示す。図-10から、ここでの主要動部のH/Vスペクトルは、地震によらずほぼ同様の周期特性を示していることがわかる。

次に、常時微動フーリエスペクトルからスペクトル比(地表/地中)および地表H/Vスペクトルを求め、更に、図-8の地盤柱状図、地盤物性値をもとにモデルを設定し、S波の重複反射理論による理論増幅スペクトル求めた。

図-11に常時微動のスペクトル比(地表/地中)および地表H/Vスペクトルと理論増幅スペクトルを重ねてプロットした例を、図-12に常時微動の地表H/Vスペクトルおよび図-10を平均したH/Vスペクトルと理論増幅スペクトルを重ねてプロットした例を示す。これらの図から、理論増幅スペクトルはやや短周期であるものの常時微動のスペクトル比および強震記録のH/Vスペクトルと理論増幅スペクトルとは比較的よく調和していることがわかる。

ここでも岩沼サイト同様、各種相関解析を行った。微動波形の各成分ごとの地表と地中(-2.5m)の相互相関係数から水平動成分は方向によって異なるものの、NS成分では約0.02秒の、UD成分では約0.005秒のタイムラグが読み取れ、これから推定される V_s 、 V_p は、図-8の実測の物性値と矛盾しない値であった。また、微動の非定常スペクトルのそれぞれの周期毎に、地表と地中(-2.5m)の相互相関係数を求めた。深さが2.5mと浅いため岩沼サイトほど顕著ではないものの、ここ鳴子サイトでも微動の伝播特性は実体波的な波動と、表面波的な波動をもつ周期の波が混在することが示唆された。

4. まとめ

本研究ではボアホールを利用した最も簡単な常時微動鉛直アレー観測を行い、その結果をもとに常時微動特性について考察した。ここで得られた結論をまとめると以下の通りである。

- 1) 常時微動の地表・地中のスペクトル比は、S波理論増幅スペクトルとよく調和する。
- 2) 常時微動記録の周期特性と強震記録の周期特性は比較的よく対応する。
- 3) 常時微動波形の相互相関係数から求めた V_s 、 V_p は、これまでの経験的な値(実測値)と矛盾しない。
- 4) ここでの常時微動の伝播特性は全体的には下から上へ伝播する特性を持つことが示された。
- 5) 周期毎の地表・地中の相互相関係数の考察から、周期によって実体波的な波動と、表面波的な波動が混在することが示唆された。

謝辞：本研究では国立防災科学技術研究所より提供されているK-NETの強震記録を一部利用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kamiyama,M and Matsukawa,T : *Proc. of the 6th Japan Earthquake Eng. symposium*,pp.481~pp.488,1982.
- 2) 松川忠司,神山眞,杉戸真太：軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム,pp.233~pp.240,1994.
- 3) 国立防災科学技術研究所強震ネットホームページ：URL:<http://www.k-net.bosai.go.jp/>,1996.
- 4) 今井常雄,麓秀夫,横田耕一郎：第4回日本地震工学シンポジウム,pp.89~pp.95,1975.
- 5) 土岐憲三：構造物の耐震解析,技報堂出版社,1985.
- 6) 神山眞：土木学会論文報告集, 284号,pp.35~48,1979.