

微小地震観測による地すべり土塊の三次元形状 と地震応答特性の評価

森 伸一郎¹・大竹 秀典²

¹愛媛大学 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 環境建設工学コース准教授
(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

E-mail: mori@ehime-u.ac.jp

²愛媛大学 大学院理工学研究科 生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)
E-mail: hiddenori.otake.06@cee.ehime-u.ac.jp

地すべり地の地震時挙動を考えると、地すべり土塊の3次元形状と地震応答特性を評価することが重要である。本研究は、それらの評価を微小地震観測により行うことが有効であることを例示する。我が国でも活動度の高い高知県の長者地すべり地で微動観測を行い、昼夜の別なく振動レベルが低く、はじめに通常の微動計では測定不可能なほどであることを示す。そのような低レベル微動環境は微小地震観測にとっては好都合である。2日間の微小地震観測で3地震が観測でき、方位角の異なる3地震で地震応答特性が変わらず評価できること、また、卓越振動数が特定できることを示す。また、我が国の地震観測機関の観測情報の公開は、このような微小地震観測の工学利用を有効なものにしている。

Key Words : landslide, micro-earthquake, seismic response, earthquake observation, microtremor

1. はじめに

地すべり対策では、すべり土塊の形状や分布状況を特定することが必要で、まずそのために調査が行われる。それは、現地踏査によるすべり土塊の平面形状の把握とボーリング調査によるすべり面深さの判定からなる。動きの遅い地すべりの場合にはボーリング孔を利用して孔内傾斜計による観測結果により、すべり面を特定することが可能となる。高密度にこれらを行えばすべり面の形状を3次元的に捉えられる。観測による特定が難しい場合は、すべり面の深度は、規模、すべり幅・長さなどから経験則で推定されることが多い。

すべり面は、粘土鉱物を含んだ堆積岩内や粘土層で生じるケースが多く、固さや透水性の異なる地層境界、特に流れ盤状に傾斜した地層にすべり面が形成されることも多く、地下水浸透で劣化が進み地すべりの誘因となる。一方、対策工事を必要とする大規模な地すべりのほとんどは、過去の活動履歴により、すべり面より上方のすべり土塊は緩んでいることも多い。

このような地盤構成を地盤振動の観点から見ると、地すべり面を境に地盤振動インピーダンスのコント

ラストができ、すべり面より上部の土塊の固有振動が励起されやすい状況となっている可能性が高い。その場合、微動測定によりすべり土塊の固有振動数が特定でき、別にすべり土塊（表層）のせん断波速度を評価しておけば、すべり土塊の深さが誤差10%程度で推定できると考えられる。これは、すべり面の深さの判定やすべり面形状の3次元的な特定のための調査工事に多大な費用と時間がかかっている現状を打破できる可能性がある。これらが短時間で経済的にできるのであれば、ボーリングの特定精度に比べて低くても十分に有用である。特に、時間的に効果的な手法であれば、実務的にも大変有用な手法となりうる。このような観点から、微動調査法の適用性を表面波探査と併せるなどして開発している^{1),2)}。

一方、地すべり地は山間地に位置するため、特に1Hz以上の振動数領域での微動源として寄与の大きい交通振動、機械振動などの人間活動は都市域に比較して格段に低い。そのため微動探査にとっては超低レベルの微動環境¹⁾を原因として探査ができないことが懸念される。したがって、微動調査を地すべり地に適用するためには、高感度地震計である微動計の電源ノイズ、機器ノイズなど電気ノイズを上回る微動信号が必要となる。SN比の問題もさること

ながら、信号そのものが検出できるかどうかに適否が左右される³⁾。

その点、逆に微動レベルが低いということは、地震観測の立場から見れば微動はノイズとなるので、ノイズレベルの高い都市域に比べて極めて低い微動環境は微小地震観測には好都合である。特に、最近では気象庁や防災科学技術研究所により毎日の発生地震の諸元決定が一元化され、翌日にはインターネットを通して入手することができ、独自の観測記録での微小地震（ $M=1\sim3$ ）はもちろん極微小地震（ $M<1$ ）の特定が容易になっている。水平成層仮定の表面波の理論に基づく逆解析に立脚した微動調査の適用が多い都市域に比べて、微小地震観測は山間地・過疎域や地方中小都市の有効な地盤調査法となる可能性を秘めている⁴⁾。

さらに、今後に懸念される東南海地震・南海地震などの広域に影響を与える大規模地震を考えると、地すべりの地震時挙動やそれによる活性化などが懸念される。地すべり地の地震時挙動を考えると、地すべり土塊の3次元形状と地震応答特性を評価することが重要である。

本論文は、そのような観点から微小地震観測による地すべり地の地震応答特性を評価することにより、地すべり地で要求される項目の調査ができる可能性を例示するものである⁵⁾。

2. 地すべり地における微小地震観測

(1) 観測対象とする長者地すべり

微小地震観測をこれまで実施した地すべり地は、愛媛県大洲市佐賀畑、高知県大野市八畝、高知県長者の3地区である。観測の際には、併せて測線微動測定も実施している。ここでは、四国でも地すべり活動が大規模、大変位で長期間にわたり対策が継続して行われている長者地すべり地を対象に報告する。

図-1に対象地点（地震観測地点）の位置と後述の観測された微小地震の震央位置を示す。長者地すべりは、高知市の西北西約40kmに位置し、一級河川仁淀川の支川である長者川に沿う仁淀村長者にある。ここは大規模な蛇紋岩地すべり地として全国的に知られており、延暦11年（792年）の大崩壊、寛政4年（1792年）、文政5年（1822年）に大洪水による地すべり災害が仁淀村史などで記述されている。近年では、昭和33年に建設省所管の地すべり防止区域に指定され、昭和28年度から「地すべり対策事業」により対策も行われているが、現在でも地すべり活動は依然として継続している。

また、図-2に長者地すべり地の主要な地すべり区域を示す。地すべり土塊の規模は、幅約200m、長さ約900m、平均斜面勾配15度であり、北方向（長者川方向）に移動している。移動地すべり土塊は5個の直列するブロックから構成されており、最下部のブロックとその直上のブロックとの境界に町道が走っている。この町道に沿い、2ブロックを横断するように18個の測点を配置して単点微動観測を行う

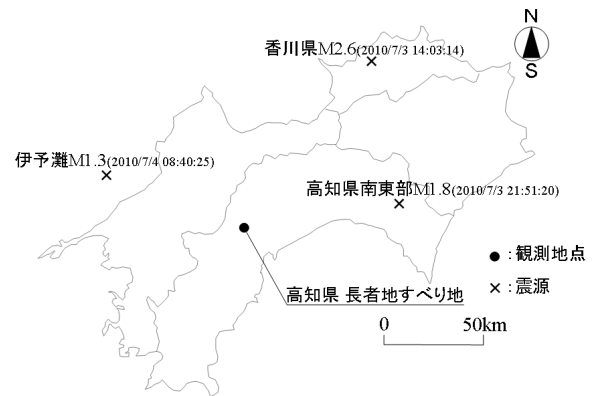


図-1 対象地点と観測された微小地震の震央位置

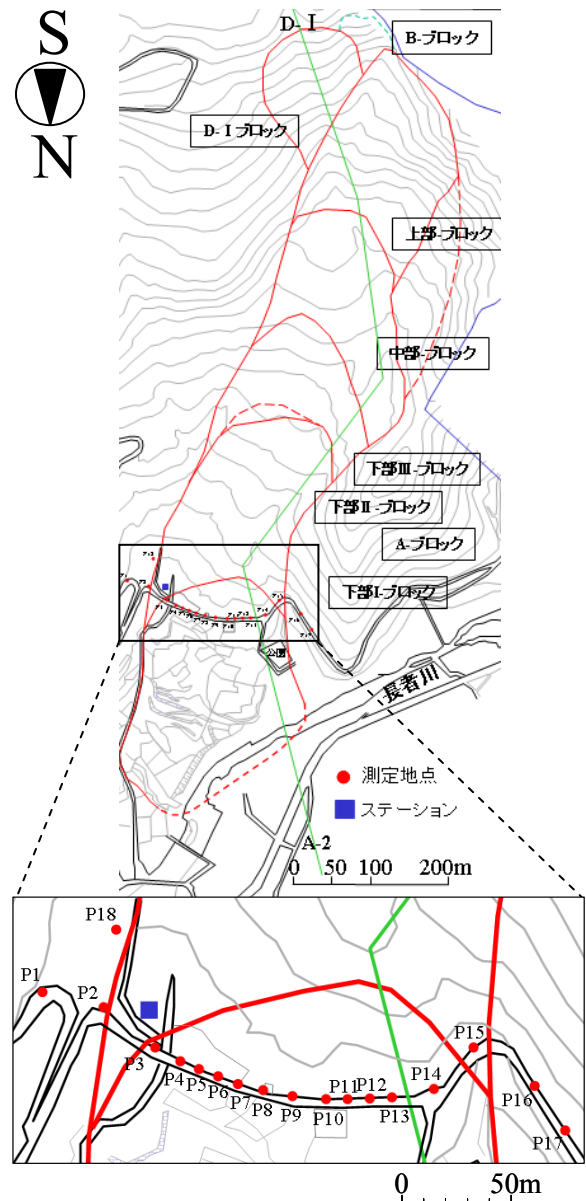


図-2 長者地すべり地の主要な地すべり区域

とともに、5点での同時微小地震観測を行った。単点微動観測は、この測線以外に13地点でも行った。

(2) 微動観測と微小地震観測の方法

観測に用いたのは、動電型の速度計で、4.5Hzの固有振動数を有する振動子をコンデンサーレギュレーション方式（CR方式）で、0.5～20Hzでほぼ平坦な周波数特性を有する速度計CR4.5-2S（物探サービス製）と計測器GEODAS-10-24USB（物探サービス製）である。長周期側は2秒まで測定することができる。

P1からP18の測点の内、測点P1とP18はブロックの東外側に、測点P16とP17はブロックの西外側に、残りはブロック内に配置した。微小地震観測を行ったのは、中心線より東側で、P18、P2、P3、P7、P10の5点であり、P18はブロック外側、P2は側方境界線上、P3は上下境界線上、P7とP10は歴史的に大きく移動している最下部ブロック中央である。P18では不動側にあるのに対して、P7、P10などの移動土塊中央部では、下方基盤に対して明瞭な構造境界を持ち、波動インピーダンスも異なっていると思われる。

微動観測では、10Hz前後の卓越振動を想定して、サンプリング周波数200Hzで行い、1ヶ所5分間測定を2回行った。解析では、10.24秒を1セグメントとし、オーバーラップなし8セグメントの平均化し、バンド幅0.7HzのParzenウィンドウで平滑化した。

微小地震観測は、2010年7月2日（金）19:30から7月4日（日）14:20までの43時間行った。データ数削減のためサンプリング周波数を100Hzとし、30分間の記録を1セットとする連続観測を行い、86セットのデータを得た。

(3) 微動観測

図-3に全測点における微動のNS成分フーリエスペクトルを示す。左側には生、右側には平均化とバンド幅0.7HzのParzenウィンドウ処理を行ったものを示す。全地点ともほとんど同じである。そこで速度計の電気ノイズによる記録を調べるため、振動子が動かないようにして測定した結果を電気ノイズとして記録した。図-4にブロック中央で最も土塊厚さが厚い（すなわち、最もゆれやすい）と期待されるP10とブロック外側で最も安定した地点であるP1の2地点でのNS成分のスペクトルと電気ノイズを示す。P1では微動と電気ノイズはほとんど変わらない。一方、P10では8Hz付近で微動がやや電気ノイズに比して卓越するようにも見えるが、やはり有意な違いは無いと言える。

このような特徴について普遍的なのかどうか調べるために、観測した43時間の記録より、3時間間隔で20.48秒間を1セグメントとした速度波形振幅データを対象にして算出した平均値と標準偏差を有する標準偏差の80パーセンタイル値の時間変動を調べた。図-5に(a)NS成分と(b)UD成分の80パーセント振幅の45時間時間変動を示す。概ね2日分の時間変動であるが、日周期の変動は明瞭でなく、微動における

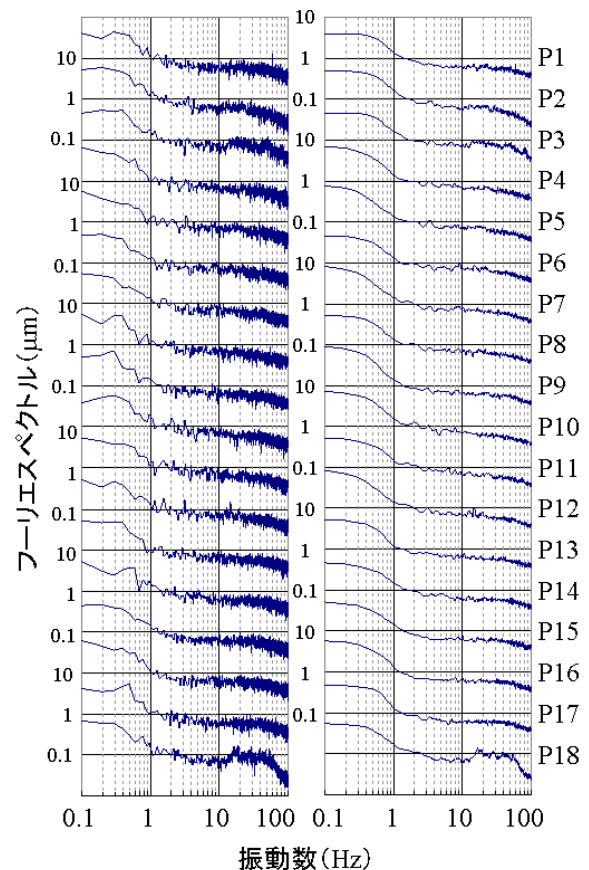


図-3 全測点における微動のNS成分速度フーリエスペクトル

人間活動の影響はほとんど見られないことがわかる。したがって、地すべり地特有の傾向であると言える。すなわち、当該地すべり地では、微動探査は有効に用いることができないと判断できる。

(4) 微小地震観測

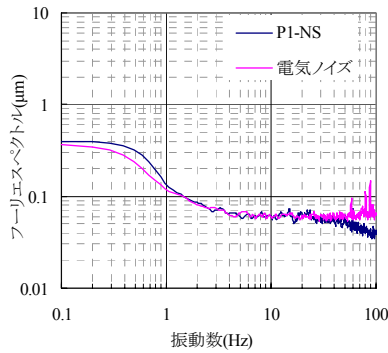
(a) 観測できる地震の範囲

地震動の振幅が距離減衰式でモデル化されるように、震源距離 X とマグニチュード M の関係より、微小地震が地震動として観測される可能性の目安がわかる。Hi-netの一元化処理震源リスト⁶⁾から観測中に発生した全ての地震の緒元を整理しこの関係を求める。

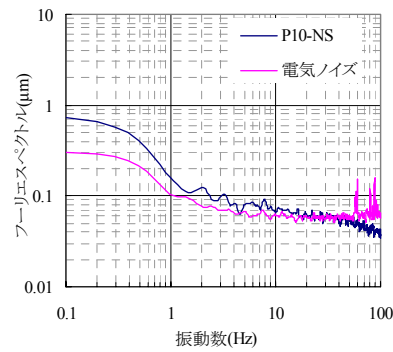
図-6に43時間でHi-netで観測された地震の震央距離と M の関係を示す。観測中に744個の地震が観測されている。図中には発震時刻と我々の観測記録波形より微小地震と判断できる3つの地震を明示した。これらの3地震以外の地震は観測できなかった。したがって、適当な距離減衰式を仮定して一定の速度振幅を示す右上がりの直線で観測限界を設定することができるであろう。震央距離 $\Delta=50\text{km}$ で $M=0.4$ の地震と $\Delta=380\text{km}$ で $M=3.9$ の地震が観測されているかどうか問題であったが、電気ノイズに埋もれており、図に示した観測限界を確認できた。

(b) 観測できた地震動から抽出できる情報

表-1に観測された3つの微小地震の諸元を示す。また、震央は図-1に示したように観測点から見て震

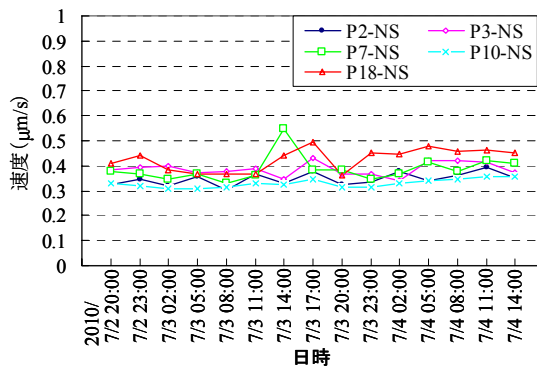


(a) P1 の NS 成分スペクトルと電気ノイズ

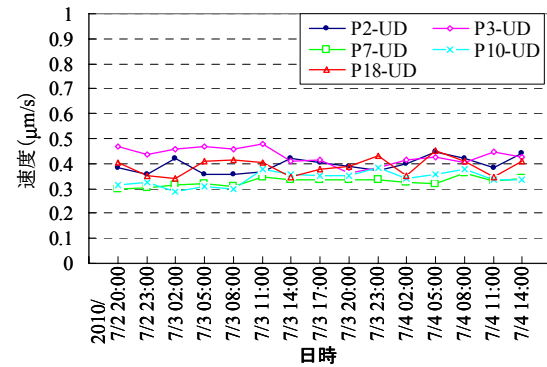


(b) P10 の NS 成分スペクトルと電気ノイズ

図-4 P1 と P10 の NS 成分スペクトルと電気ノイズ



(a) NS 成分の 80 パーセント振幅の 45 時間時間変動



(b) UD 成分の 80 パーセント振幅の 45 時間時間変動

図-5 NS 成分と UD 成分の 80 パーセント振幅の 45 時間時間変動

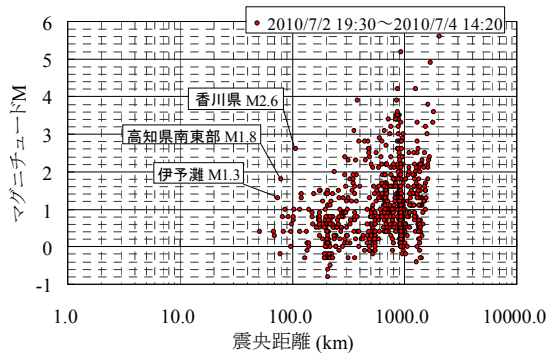


図-6 43 時間で Hi-net で観測された地震の
震央距離と M の関係

央方位角が37度、80度、291度となるようにさまざまな方向に位置している。5つの観測点の中で、地すべりブロックより外側のP18が最も応答が低く、地すべりブロック中央のP10が最も応答が大きくなることが予想される。そこで、これら2点のNS成分について見てみる。

図-7に上記2地点における3つの地震動の水平動時刻歴（振幅が大きい方向成分）を示す。香川県M2.6の地震が最も応答振幅が大きくなっており、2地点ともに明瞭な地震波形が認められる。一方、他の2つの地震ではP10でろうじて地震波形が認められるが、P18では認められない。

そこで、図-8に微小地震動と微動のNS成分のフ

ーリエスペクトルを示す。この際の微動のスペクトルは、微小地震観測中に観測された微動を解析したものであり、単点微動観測の解析とは異なり、観測条件・解析条件は微小地震動のそれに合わせている。

良くゆれると予想されたP10では、いずれの地震でも微動レベル（電源ノイズ相当）を有意に上回っており、香川県M2.6の地震では1.5HzでS/N比2以上を確保しているし、高知県M1.8と伊予灘M1.3では3.2Hz以上でS/N比2以上を確保している。

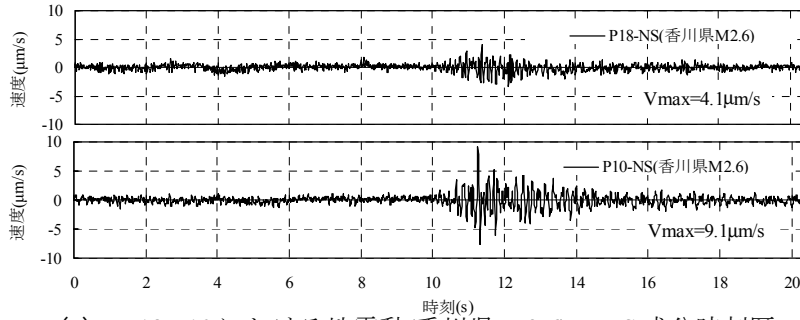
あまりゆれないと予想されたP18でも、香川県M2.6の地震では1.5HzでS/N比2以上を確保しているが、高知県M1.8と伊予灘M1.3では全域でS/N比2を確保できない。6-20HzではS/N比がやや大きく、かろうじて振動がノイズより大きい。

そこで、地震応答特性として評価できるのかどうかを、最も安定した地点に対する周波数応答特性で評価することを考え、その様子を検討する。図-9にP18に対するP10の周波数応答特性（H/H比）を示す。香川県M2.6の地震では4-5Hzと7-9Hzの2ヶ所で5倍の増幅を示すピークがあるが、高知県M1.8と伊予灘M1.3でも5Hz付近と7-9Hzの2ヶ所で2-3倍の増幅を示すピークがあり、地震方位角が異なり、マグニチュードが異なっているが、卓越振動数としては安定して現れていると言える。Mが小さい地震で増幅が小さいのは、基準としているP18では電気ノイズに埋もれている振動数成分があり、その分、増幅を小さく見積もることになる。したがって、振動レベルが低い場合には増幅を議論することはできない

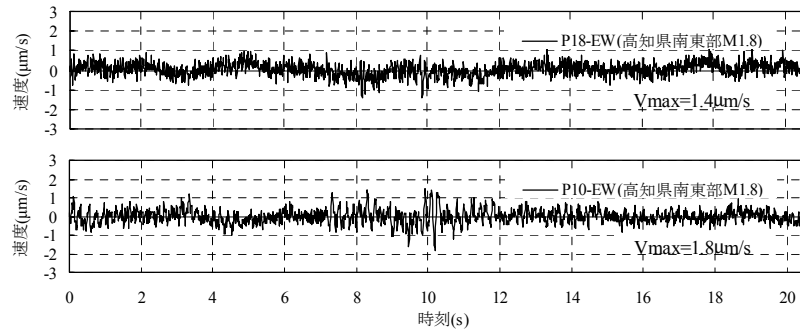
表-1 観測された3つの微小地震の諸元

測定場所	緯度(度)	経度(度)
長者地すべり地	33.498	133.131

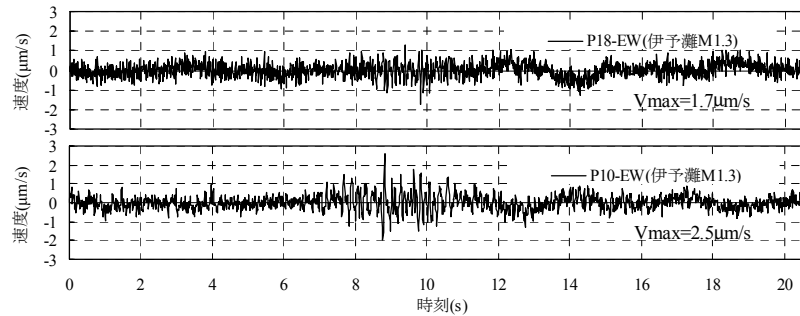
発震日時	震源地域名	緯度(度)	経度(度)	深さ(km)	Mjma	震央距離(km)	測定地点からの方位角(度)
2010/7/3 14:03:14	香川県	34.267	133.836	16.2	2.6	107.3	37.2
2010/7/3 21:51:20	高知県南東部	33.614	133.98	17	1.8	79.8	80.5
2010/7/4 08:40:25	伊予灘	33.745	132.386	47	1.3	74.3	291.8



(a) P18,P10における地震動(香川県 M2.6)のNS成分時刻歴



(b) P18,P10における地震動(高知県南東部 M1.8)のEW成分時刻歴



(c) P18,P10における地震動(伊予灘 M1.3)のNS成分時刻歴

図-7 P18,P10における3つの地震動の水平動時刻歴

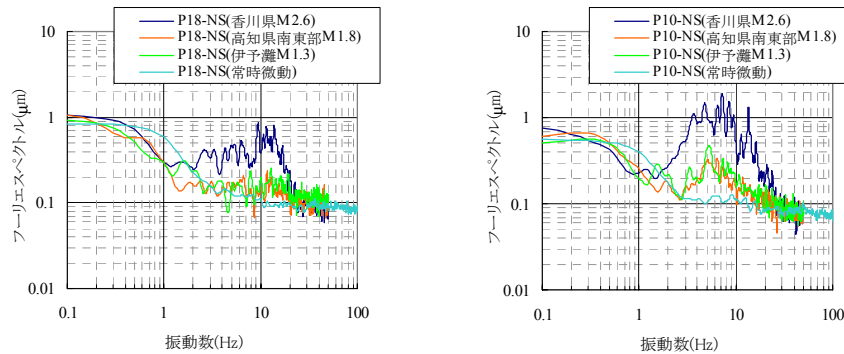


図-8 微小地震動と微動のNS成分のフーリエスペクトル

が、卓越振動数を推定することには利用できる可能性がある。卓越振動数の推定ができれば、表層地盤のせん断波速度を他の方法（表面波探査など）で知ることができれば、表層厚さを推定することができることにつながり、地すべり土塊の表層厚推定のための有効な概略探査法として成り立つと考えられる。

3. 長者地すべりの地震応答特性

(1) P18を基準にした水平動スペクトル比

前章末節で検討したように、微小地震観測による地震動のスペクトルやスペクトル比は、地震応答特性を評価するのに適していることがわかった。振幅特性を議論するにはある程度のS/N比が必要であろうが、卓越振動数の評価にはより低振幅の地震動でも有効であることがわかった。

そこで、本章では、P18を基準にした場合の各地点の地震応答特性を論じる。

図-10にP2, P3, P7の水平動スペクトルとP18を基準にした水平動スペクトル比（H/H比）を示す。

P18と同じく、すべりブロックの東境界の外側にあるP2については、香川県M2.6の地震では1.5～16HzでS/N比2以上を確保しているが、高知県M1.8と伊予灘M1.3ではS/N比2を確保できていない。香川県M2.6の地震ではH/H比は7-9Hzで1.5倍程度と見ることが出来るが2～16HzでH/Hは、おおよそ1である。したがって、P2はP18と同様に、地すべりブロックに比して硬い地山であり、相対的に増幅特性に違いがないと言える。他の2つの地震も同様の形状である。電気ノイズレベルと等しい微動も同様の形状を呈しており、形状の類似性のみから無批判に硬い地山であるとの解釈をすることが危険であることがわかる。

すべりブロックの東の内側にあるP3については、距離的にP2に近いといえども、スペクトルは明瞭に異なる振動特性を呈している。H/Hスペクトル比を見れば、微動は平坦な様子であり、電気ノイズのスペクトル比を見ているに他ならない。P3については小さい2地震においても4～10HzでS/N比が2以上であり、H/H比で4～10Hzの領域で見られる7-8Hzに明瞭な卓越のあるピークが3地震共通して認められる。増幅が香川県M2.6の地震に比べて他の地震で小さいのは、S/N比の低さに起因している。

(2) P18を基準にした水平動最大値

前節で検討した結果、卓越振動数周辺以外ではS/N比が低くスペクトル増幅特性も評価できないことがわかった。したがって、スペクトル特性が反映される時刻歴振幅特性にも低S/N比の影響が現れるはずである。しかしながら、最大値の応答特性もまた重要であるので、どの程度信頼できるのかを検討しておくことは重要である。

図-11に最大速度の空間分布を示す。P18が最も小さく、それを基準にすると、S/N比の最も良い香川県M2.6地震では、P7, P10で増幅が大きく、NS成分

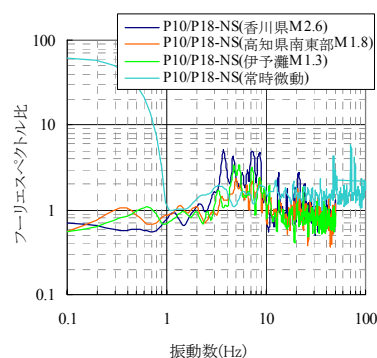
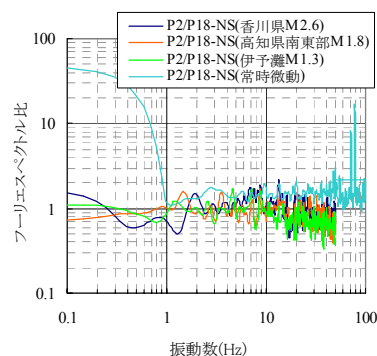
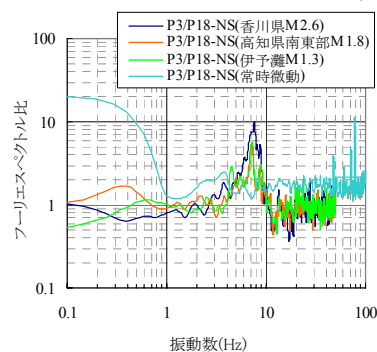


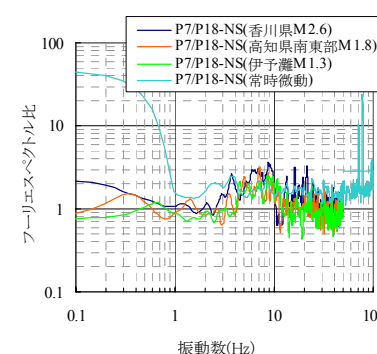
図-9 P18に対するP10の周波数応答特性(H/H比)



(a) P2の水平動スペクトル比(H/H比)



(b) P3の水平動スペクトル比(H/H比)



(c) P7の水平動スペクトル比(H/H比)

図-10 P2,P3,P7の水平動スペクトルとP18を基準にした水平動スペクトル比(H/H比)

（斜面傾斜方向）で2倍程度、EW成分（斜面走行方向）でも2倍程度、UD成分でも2倍程度となる。他の2地震では水平動において傾向は捉えることができるが、増幅率は小さく評価することとなる。これは基準となる点の地震動が小さいためである。また、

UD成分では、他の地震では概ね増幅率は1となり、電気ノイズに埋もれて、まともな評価はできないことを表している。

4. 結論

(1) 地すべり地の微動は振幅が低く、電気ノイズに埋もれてしまうことが多い。連続的な微動観測により人間活動に起因する影響は微動として現れない。したがって、地すべり地の多くでは、微動探査は有効に用いることができない。

(2) 2日間の微小地震観測で3つの地震記録を得られた。防災科研や気象庁の地震観測情報の早期公開は地すべり地の微小地震観測の成果把握を容易にさせる。

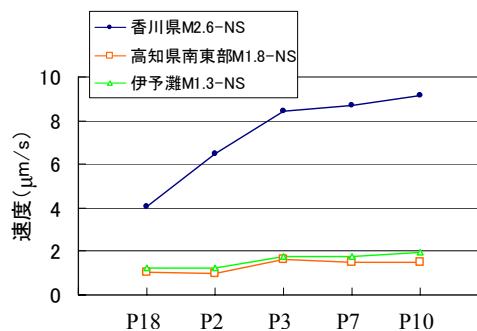
(3) 微小地震観測は、地すべり地における卓越振動数の評価に有効である。また、周波数応答特性や増幅特性の評価のためには主な周波数領域でS/N比が2以上を見込める程度の大きさの微小地震が必要である。

(4) 地すべりブロックの外側の安定した地山を基準にしたときのブロック内側の移動土塊部分の水平動スペクトル比（H/H比）は地震応答特性の評価には有効である。

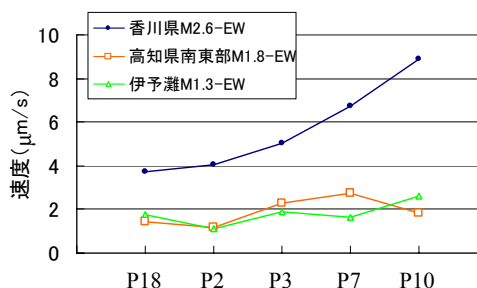
謝辞：本研究の一部は、平成22年度砂防・地すべり技術センター研究開発助成によりました。また、高知県土木部には情報提供と観測への協力を戴きました。長者地区の区長はじめ地元の方にはお世話になりました。愛媛大学工学部地震工学研究室の観測当時メンバーであった田村一樹、古川将也、松村裕樹、船越徹也の各氏には観測でお世話になりました。記して、謝意を表します。

参考文献

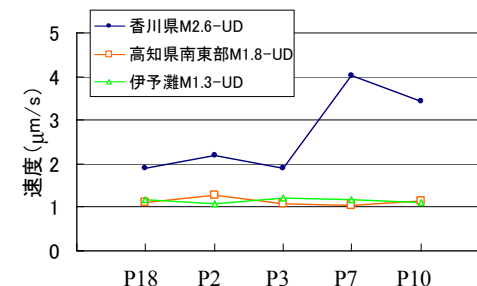
- 1) 大竹 秀典, 森 伸一郎：地すべり地の振動特性, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, 2010.
- 2) 船越 徹也, 森 伸一郎, 大竹 秀典, 増田 信：地すべり地における高密度微動測定と表面波探査による地すべり土塊の推定, 地盤工学会四国支部研究発表会, 2010.
- 3) 森 伸一郎：微動測定による地盤・基礎構造物の健全



(a) NS成分の最大速度の空間分布



(b) EW成分の最大速度の空間分布



(c) UD成分の最大速度の空間分布

図-10 最大速度の空間分布

性評価への応用, 第45回地盤工学研究発表会発表講演集, 2010.

- 4) 森 伸一郎, 古川 将也：谷池型ため池堰堤の微小地震観測, 平成22年度農業農村工学会大会講演会講演概要集CD-ROM, 2010.8.
- 5) 森 伸一郎, 大竹 秀典, 船越 徹也：微小地震観測による地すべり地の地震応答特性, 地盤工学会四国支部研究発表会, 2010.
- 6) 防災科学技術研究所：気象庁一元化処理 震源リスト, <http://www.hinet.bosai.go.jp/REGS/JMA/list/>

ESTIMATION OF 3-D STRUCTURE AND EVALUATION OF SEISMIC RESPONSE PROPERTIES OF A LANDSLIDE BLOCK BY MICRO-EARTHQUAKE OBSERVATION

Shinichiro MORI and Hidenori OTAKE

This paper demonstrates the efficiency of micro-earthquake observation for estimation of 3-D structure

of a landslide block and evaluation of seismic response properties of it, showing an example of such an observation at a national famous landslide area at Choja in Kochi Prefecture, Japan. First, we show that it is not effective to explore the landslide site in terms of underground S-wave velocity structure by conventional microtremor measurement. Next, we show that a three-day observation of micro-earthquake is effective for obtaining some recognizable micro-earthquake motions at the landslide site. Finally, we demonstrates that predominant frequencies and spectral amplification can be obtained at various points.