

地すべり地の雑微動の性質

和田卓彦・尾上謙介

CHARACTERISTICS OF MICRO-TREMORS AT THE LANDSLIDE AREA

By *Tatsuhiko WADA* and *Kensuke ONOUE*

Synopsis

The observations of micro-tremors over the Kamenose landslide area were carried out more than twelve times since 1971.

It has been definitely shown that tremors may be affected strongly in the frequency range (2-4 Hz) by the existence of cracks at the landslide area.

The directions of invisible cracks that may suggest the direction of flow of landslide motion were detected from observed tremors.

After civil engineering works for prevention of landslide motion, it has been shown that tremors may be affected in more high frequency range (5-8 Hz) by generation of cracks with shallow depth at the Yamato river side of line of long concrete piles.

1. はじめに

地すべりを地球物理学的な方法で研究するために、その一つの方法として、雑微動の観測が、地すべり地域としては日本では代表的な亀の瀬地すべり地域で実施された。この地域は、奈良盆地の流水を集めて西方に流れる大和川が、金剛、生駒山系を東西に横切るその峡谷部のほぼ中央部に位置する。亀の瀬地すべり地域では、過去多くの大規模な地すべりが記録されており、最近では1967年2月にこの地域の清水谷地区で大規模な地すべりが発生した。

その際、crack群が地すべり地全域に露頭していたことが示されている¹⁾。1971年には、仏生堂地域に未だ新鮮な形態のまま保存されているcrackが見られた。

このような地域で微動観測を行うについては、これまで堆積平野等で数多く行なわれてきたような、観測された微動をそこの水平構造と対比させるという方法をそのまま地すべり地に機械的に適用するには疑問があると考えられた。そして、亀の瀬地すべり地域に見られるcrack群によりlateral方向に分断された地盤構造がこの地域の雑微動に影響していると推測された。実際、crack群の明瞭に見られた仏生堂地域で観測された雑微動には、その2~4 Hzを中心とする中間周波数領域がここに分布するcrack群により、その振幅並びに振動方向に強く影響されていることが示された^{2), 3)}。

これらの観測結果に基づいて、亀の瀬地すべり地域ではcrack群による地盤構造と地すべり運動との関連を明らかにするために、1971年から今日までの20回以上の微動観測が行なわれた。その間には、大規模な地すべり防止対策工事が行なわれており、それらの工事を境にして、雑微動の観測結果に差異が見られることがわかった。これらについて調べた雑微動の特徴と地すべり運動との関連について述べる。

2. 観 測

2.1 観 測 原 理

亀の瀬地すべり地域を Fig. 1, 2 に示す。Fig. 1 で、太い実線は、崖状亀裂をともなう滑落崖で、1967年の大規模な地すべりの範囲を示し、またこの地すべりによって発生した主要な crack が実線で示されている。地すべりの流れの方向は Fig. 2 に矢印で示すように、山頂側から大和川側に向っている。これらの図に示されるように、地すべりが始まる境界には崖状 crack が、そして地すべりの流れの方向には、それに沿って crack が広く認められている。このように、地すべり運動は、流体が渦動を形成することで流動を容易にす



Fig. 1. Topographic map of the Kamenose landslide area. Cracks generated at that time to landslide motion in 1967. Thick line show range of landslide.

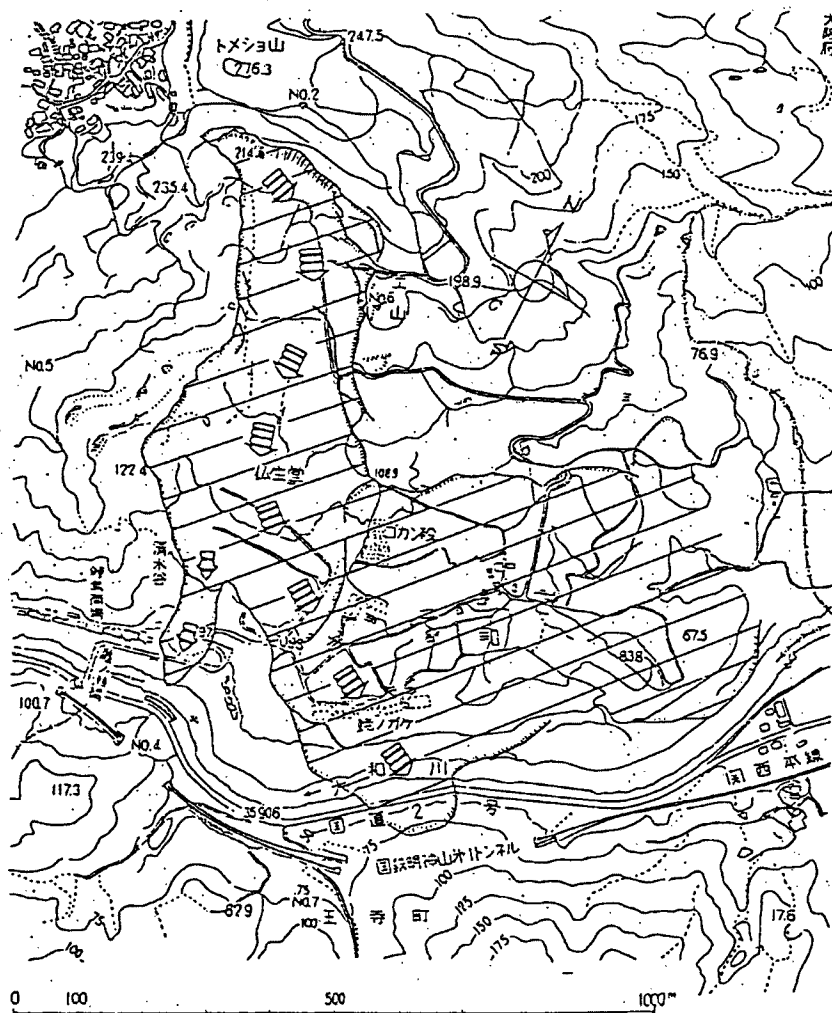


Fig. 2. The direction of flow of landslide motion in 1967.

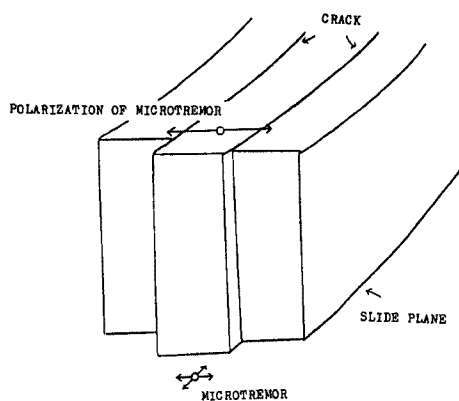


Fig. 3. Illustration of the mechanism of landslide motion. The amplitude of micro-tremors are amplified in the direction perpendicular to cracks.

るのと同様に、その渦動の位置に crack を形成し、地すべりを急激なものとしていると考えられる。したがって、crack 形成はすべり面の凹凸と流れ断面の大きさに依存しており、crack の深さはすべり面に達しているものと推測される。このことを模式的に Fig. 3 に示す。また、地すべりのその出発点は山の斜面の一定のところに滑落崖を形成しているが、それに平行した crack が分布していると考えられる。したがって、この崖状 crack は地すべりの流れの方向の crack とはほぼ直交している。いずれにしても、crack にはさまれた部分は、一定の意味で倒立した板バネとして弾性波に対応するものと考えられる。このように、底部を固定した弾性板のバネとして近似したとすると、その固有振動数は、弾性定数、厚さ、そして高さによって近似的に規定される。この場合、crack の長さは、crack 間の幅に比べて長く続くので、モデルとしての弾性板は長さ方向の影響は無視できると考えられる。したがって、その弾性板に対する固有振動 (ν) は

$$\nu \propto H/L^2 \dots \dots \dots (1)$$

H: 厚さ, L: 高さ

と近似できると考えられる。

参考として、弾性定数にこの地域に広く分布する凝灰岩の数値を入れ、仏生堂地域で実測した H を入れて計算すると、 $L \approx 40$ m で、おおむね、地すべり面の深さと一致しており、倒立板バネとしての近似が無理でないことを示している。

2.2 観測方法

ここでは crack の存在による lateral 方向の構造との対応を考えると、三成分の地震計による観測が必要である。この地域の振動は数ヘルツが卓越し特徴的であるので、地震計は固有周期1秒のもので十分であり、すべての観測にこれを使用した。

地すべり地域は軟弱な地盤の場合が多く、地震計の設置が困難で、不安定になり作動しないこともあった

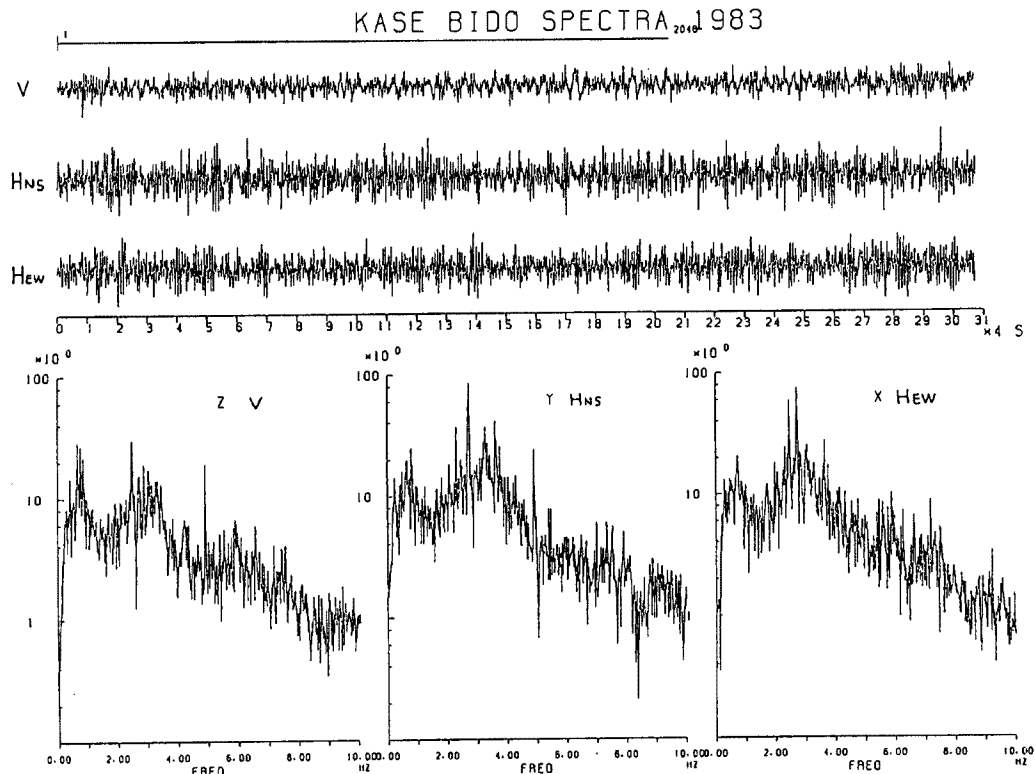


Fig. 4. Examples of seismograms and Fourier amplitude spectra of three components.

が、この場合、ステンレス製の直径 20 mm 程度、長さ 50~60 cm 程度の棒を打ち込み、その上に地震計を設置する方法により良好な記録が得られた。最近ではコンクリート製の設置台を作る方法が採用された。

crack 群の存在に対応する振動を見つけるためには、地すべりの全くない強固な岩盤上と比較することが必要であるので、亀の瀬においては、この地すべり地域に隣接する花こう岩が分布する地域のその岩盤を利用し、標準点とした。

地震計の出力は、直流増幅器を通し、その倍率を最高10,000倍から振幅の大きさにより適宜調整して、磁気テープに収録された。

微動の観測は、微動の入力が安定している条件をできる限り選び⁴⁾、人工的なノイズの少ない穏やかな深夜に限って行なった。

3. 解 析

3.1 解析方法

磁気テープから再生された記録は次の順序で解析される。地すべり地域固有の振動の周波数帯域を調べるために、フーリエ解析を行ない振幅スペクトラムを求め、それを岩盤上の標準点と比較する。この地すべり

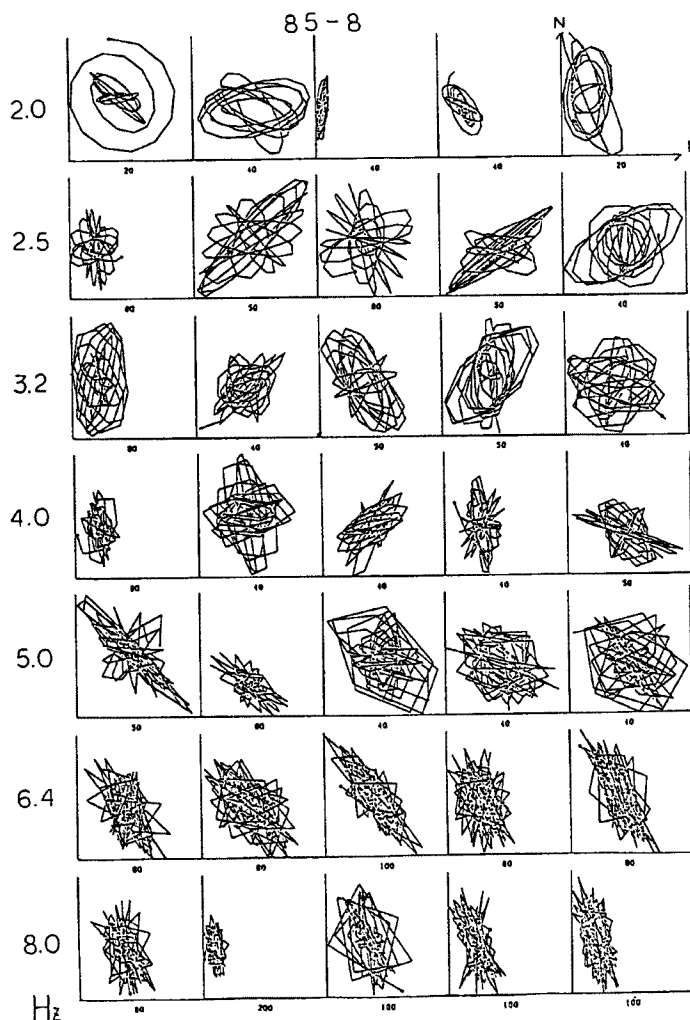


Fig. 5. Examples of particle motions of tremors in various frequency range.

地に特徴的な周波数帯について、更に数個のバンドパスフィルターを通して波形を分割し、水平二成分からベクトルとして波動の軌跡を合成し、偏奇の方向と直交した方向に crack が存在すると推定される。波形と振幅スペクトラムの例を Fig. 4 に、各周波数での水平面での波動の軌跡の例を Fig. 5 に示す。

実際、観測された雑微動は(イ)0.8 Hz 付近が卓越する低周波数領域、(ロ) crack の存在を反映する 1~10 Hz の帯域の中間周波数領域、(ハ)10 Hz より高い高周波数領域に識別された。(イ)の低周波数領域は標準点の基盤岩上でも明瞭であって、地すべり地域の地すべり構造より深部の、したがってその地域全体の深い構造を反映しているものと考えられる。又、(ハ)の高周波数領域は、きわめて表層部分を反映していると考えられ、非常に不安定で風等の擾乱源によって直接変動する。このため(イ)、(ハ)は対象から除外し、(ロ)の中間周波数領域について解析を行なった。又、波動の水平成分の偏奇はほとんどの場合、識別は容易であるが、もともと crack が不規則な形態で発生することが多いと考えられて、ある程度の軌跡の不規則性は避けられない。

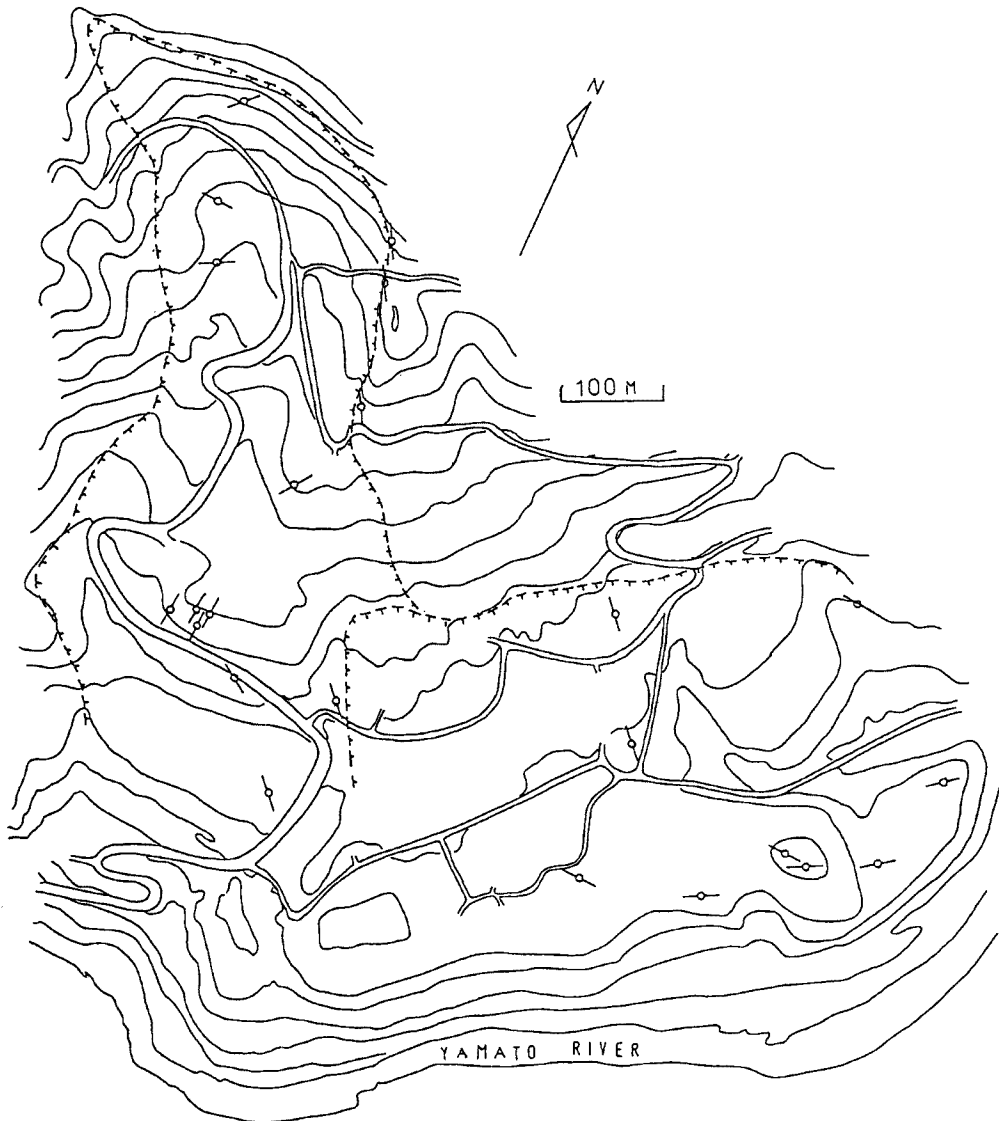


Fig. 6. Distributions of cracks at the landslide area before civil engineering works for prevention of landslide motion. marks show the head cliff which appeared due to landslide motion in 1967. —○— show the observed point and the direction of crack.

3.2 解析結果及び議論

亀の瀬地すべり地域の名称をあらかじめ説明しておく、前掲の Fig. 2 に示されているように、この地域は、主に1931年から1932年に大規模な地すべりが発生した峠地区と、主に1967年に地すべりが生じた清水谷地区からなっている。地域の北側にはここで最高のトメシヨ山があり、ここから地すべりは南側の大和川に向っている。清水谷地区の中央部に仏生堂地域がある。峠地区の東端には稲葉山があり、ここでは、今日も N30° E 方向の crack 群が見られるが、これは1967年の清水谷地区の地すべりの際に生じたものであると見られている。1931年の地すべりにより生じた crack 群は、今日では峠地区でもほとんど知られていない。

最初の微動観測は1971年3月に、観測原理で述べた考えが正しいかどうかを実証するために、当時もっとも crack が明瞭で典型的と見られた仏生堂地域で行なわれた。

この地域と、標準点の花こう岩上の雑微動の振幅スペクトラムを比較した結果、仏生堂地域では1~10 Hz の中間周波数領域の中のとくに2~3.5 Hz が卓越しており、標準点にはそれを欠いている。そしてこの周波数領域について水平二成分からその軌跡を求めると、crack の方向と直角方向に鋭く偏奇していることから、2~3.5 Hz の振動が crack 群により強く影響されていることが知られた^{2), 3)}。

又、滑落崖を境にその山頂側と地すべりの生じた側の振動を比較した結果、山頂側には仏生堂に続く地すべりの流れに沿った crack とほぼ直交している崖状 crack の分布が見られた^{2), 3)}。このようにして、推定された crack 群とその雑微動への影響は、これらの観測で確認されたと考えられる。したがって、適当に観測点を選んで同様の観測を続ければ、地表面ではもはや見分けられないか、或いは、十分開口していない crack 群を微動によって推測することが可能になると考えられた。一方ではこのような観測を続けたが、他方、その間に亀の瀬地すべり地域では、地すべり防止工事が、一つは上方での排土、一つは下方での巨大なコンクリートのパイル——深礎工——による土止め工事が進行していった。これらの防止工事に伴って、これまでの雑微動の観測結果と工事後の観測結果の間に差異が見られることがわかった。1974年から1980年までは山頂近くでの排土、1980年以降は主として峠地区から深礎工事が始まり、清水谷の下方にもその工事が次々に行なわれるに至っている。したがって、1980年以前と以後にわけて述べる。

(1) 地すべり防止対策工事までの結果

1980年以前の約10年間の観測結果をまとめて Fig. 6 に示す。ただし、山頂近くの排土工事は下方の観測結果に影響がなかったものと考えられるので、排土付近は工事以前の観測結果を用い、下方は工事期間中及びその後の観測結果をも附加した。図には1967年の地すべりの際に生じた滑落崖を示しているが、この内側が地すべりを生じた部分である。観測点が少なく十分には結論は述べられないが、推定された crack 群はほぼ系統的に分布していると考えられる。

すなわち、清水谷地区では、滑落崖の外側には、これと平行方向の崖状 crack 群が推定される。一方滑落崖の内側には、それに近いところでは崖状 crack と直交する方向の crack が見られる。したがって、地すべりの流れは崖状 crack を上端とし、そこから中央部に向っていると推測される。仏生堂地域では、crack 群は南北方向に分布しており、その南方ではそれは N45° W 方向に変わり、同じ方向で峠地区に続き、さらにはその延長上の大和川へと続いていると推定される。これらの crack 群の方向は、地すべり運動の流れの方向を示していると考えられる。この方向は Fig. 2 に示された1967年の地すべりの際に、大和川を越えて対岸の国道を隆起させた地すべりの流れとはほぼ同じ方向である。

峠地区では、その西方の crack 群は清水谷地区から続く N45° W 方向に分布しているが、東方では、東西方向になり、さらにこの地区の東端にある稲葉山地域では N30° E 方向になる。これらの crack 群の方向の変化は、清水谷地区から続く地すべり運動の流れが、稲葉山地域に至って、大和川付近の何らかの障害により停止されることにより生じたものと推測される。

(2) 地すべり防止対策工事の crack 形成への影響

1980年以降の観測では、清水谷地区では主に排土工事により、また峠地区では深礎工事により crack 形成に変化が見られるようになったので、1980年以降の観測結果を Fig. 7 にまとめて示し、各工事の影響につ

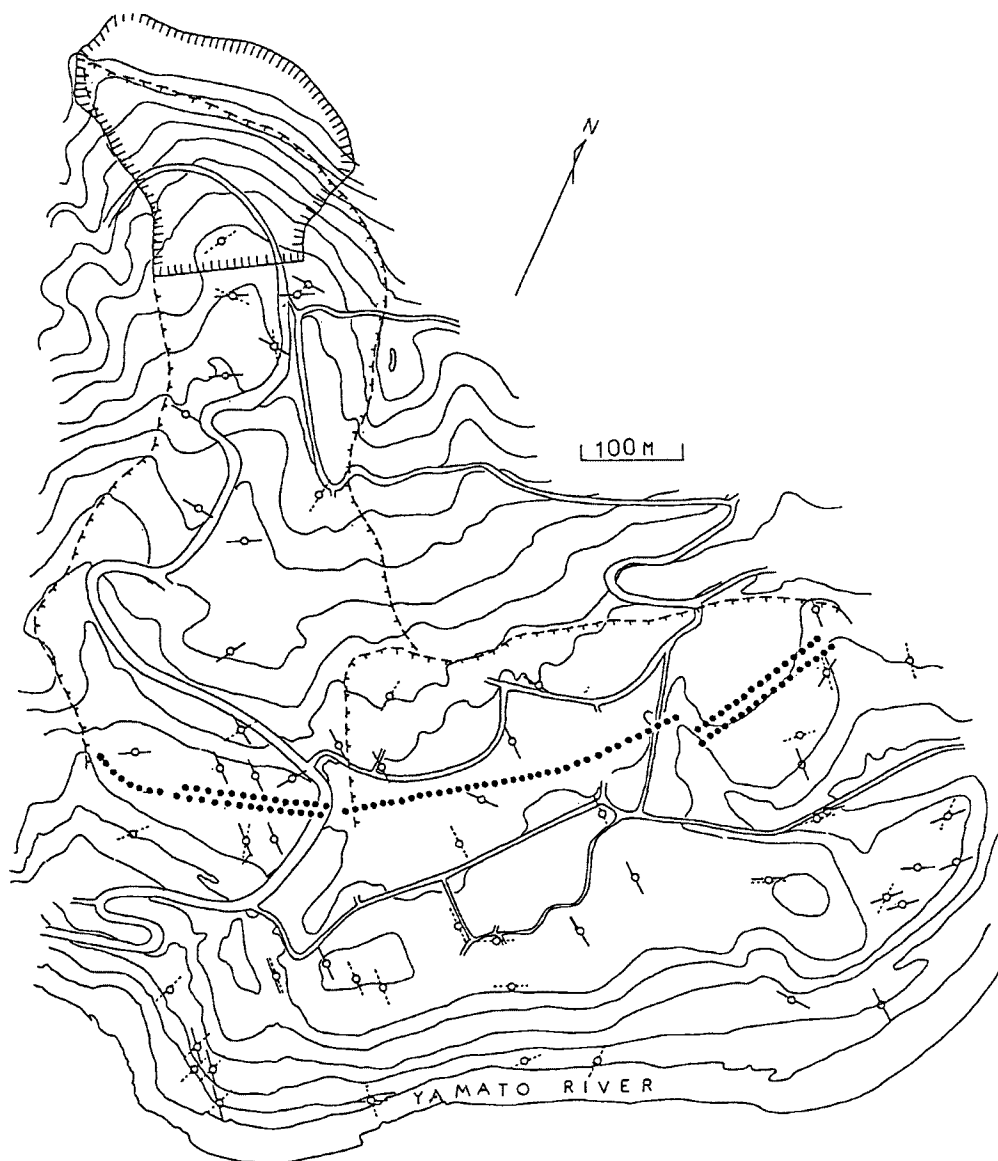


Fig. 7. Distributions of cracks at the landslide area after civil engineering work for prevention of landslide motion. ● marks show long concrete pile. --- mark show dug area of the ground in 10~15 m depth. ---○--- mark show generation of cracks with shallow depth.

いて述べる。

(a) 排土工事による影響

排土地域はトメシヨ山の南斜面を含んでおり、その範囲は Fig. 7 に示されている。工事の期間は1974年から1980年までで、排土の深さは地表から10~15 mに達している。

この地区での排土後の観測は、1985年からであるが、Fig. 7 に示されるように、排土地域の下方の西方では、crack 群は $N60^{\circ}E$ か東西方向にある。これらは Fig. 6 に示された排土以前のこの付近での観測結果と同じで、また Fig. 1 に示されている crack 群ともほぼ同じ方向を示していることから、ここでは1967年の地すべりで発生した crack 群を反映しているものと考えられる。

一方、これらとは反対側の東方では、同じ $N60^{\circ}E$ 方向の crack 群が見られるが、これは1967年にここで生じた crack 群とは方向が約 90° 異なっており、注目される。そして、これは排土地域の南端の境界とはほぼ平行方向であることから、この付近には排土後新たな崖状 crack が形成しつつあると推測される。

清水谷地区の下方では排土工事によると見られる影響は明瞭には認められていない。

(b) 深礎工事による影響

深礎列は Fig. 7 に黒丸で示してあるが、峠地区のほぼ中央部に東西方向に一列に、あるいは二列に建設されている。その一本の深礎工は直径が約 5 m、そして地すべり面よりさらに数 m～数十 m の深部に達する長い鉄筋コンクリート製の巨大なパイルである。峠地区の工事は1980年から始められ、1984年に完成しているが、この工事は続いて清水谷地区でも行なわれた。しかし、その完成が1987年で、ここでの観測期間中はまだ工事が行われていなかったり、また工事中であったため、清水谷地区での観測結果には、深礎列の影響は明確には認められていない。

完成した深礎工上で観測を行ったところ、そのスペクトラムは Fig. 8 に示すように、中間周波数領域は認められず、花こう岩の岩盤上とほとんど同じであることから、深礎工はその安定な基盤部分と緊密に結合していることを示している。したがって、深礎列は強固な壁を形成していると思われる。

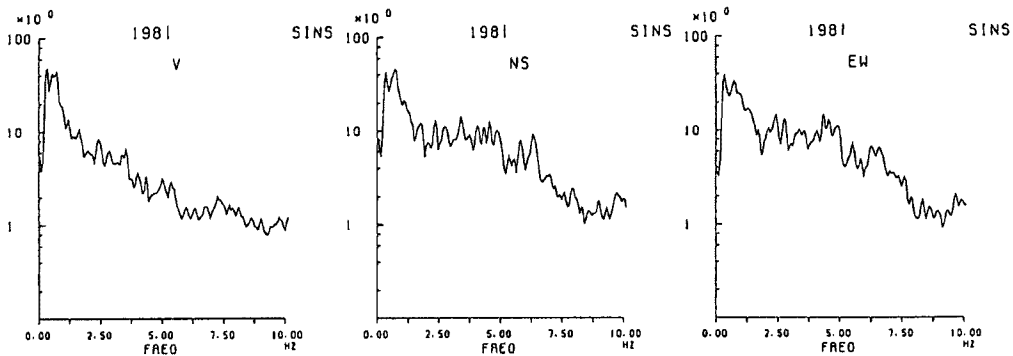


Fig. 8. Examples of Fourier amplitude spectrum on concrete pile.

深礎列が crack 形成にどのように影響したかを調べるために、観測の時期の順にスペクトルを比べると Fig. 9 に示すようになる。図の最上段の Ysub は峠地区のほぼ中央部の地表下約 50 m の試掘坑道内におけるスペクトラムで、花こう岩の岩盤上とほとんど同じであることから、ここを峠地区の標準点とした。各スペクトラムは同じ観測点ではないが変化が見られる。すなわち、1981年までは 2～4 Hz が鋭く卓越しており、より高い周波数領域には卓越は見られない。しかし、1984年以降には 2～4 Hz の周波数領域に加えて、より高い周波数の 5～7 Hz にも卓越しているのが見られる。水平面での波動の軌跡を見ると、1986年の一例を Fig. 10 に示すように、2.5 Hz には偏奇は見られないが、6.4 Hz は $N30^{\circ}W$ 方向に鋭く偏奇している。このことは深礎列の大和川側では、その完成とともに、新たなクラック群が形成されているものと推測される。このような 5 Hz 以上の卓越周波数に対応する crack 群については、その crack 間隔が大きくなったとは考えにくく、ここではむしろ浅い crack が形成されたと考えるのが自然である。したがって、前述の (1)式から、深礎列の大和川側では、これまでの深い crack の約 7 割程度の深さの crack 群が形成されていると推測される。この浅い crack 群をこれまでの深い crack 群と区別して、Fig. 7 には点線で表示した。

Fig. 7 は、深礎列の工事期間を含むすべての観測結果を示しているが、crack 形成の様子がわかりにくいので、さらにそれを詳細に見るために、深礎列付近の crack 群の形成が深礎列の工事の進行とともに、どのように変化したかを調べて、それを Fig. 11 に示した。同一場所でくり返し観測されておらず、また観測点が少ないために、不明瞭ではあるが、深礎列の工事の進行とともに、新たな浅い crack 群の発達する傾向が

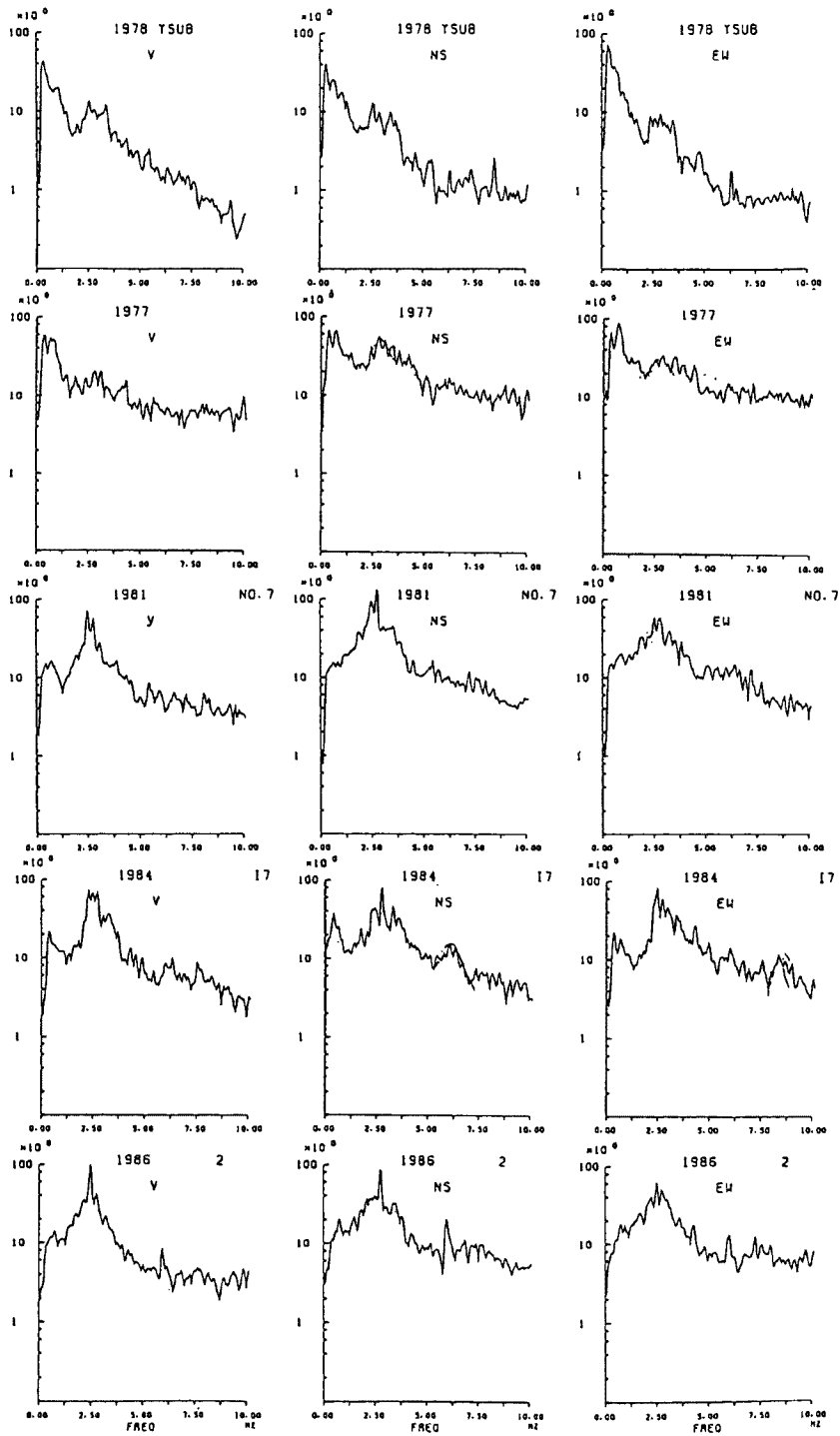


Fig. 9. Examples of Fourier amplitude spectrum at the Yamato river side of line of long concrete piles. Ysub are standard point.

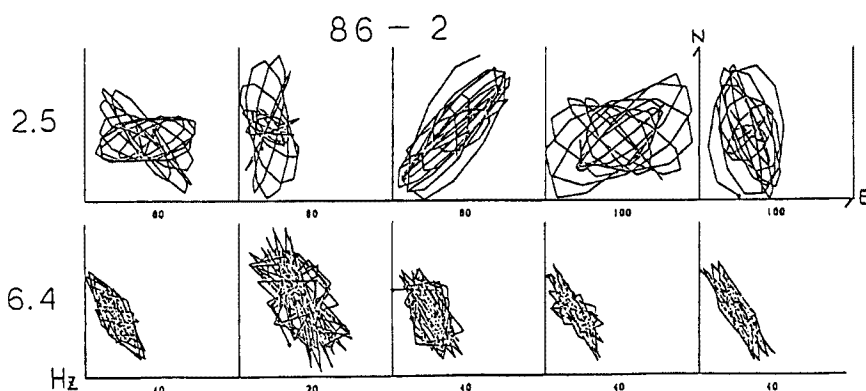


Fig. 10. Examples of particle motions of tremors at the Yamato river side of line of long concrete piles.

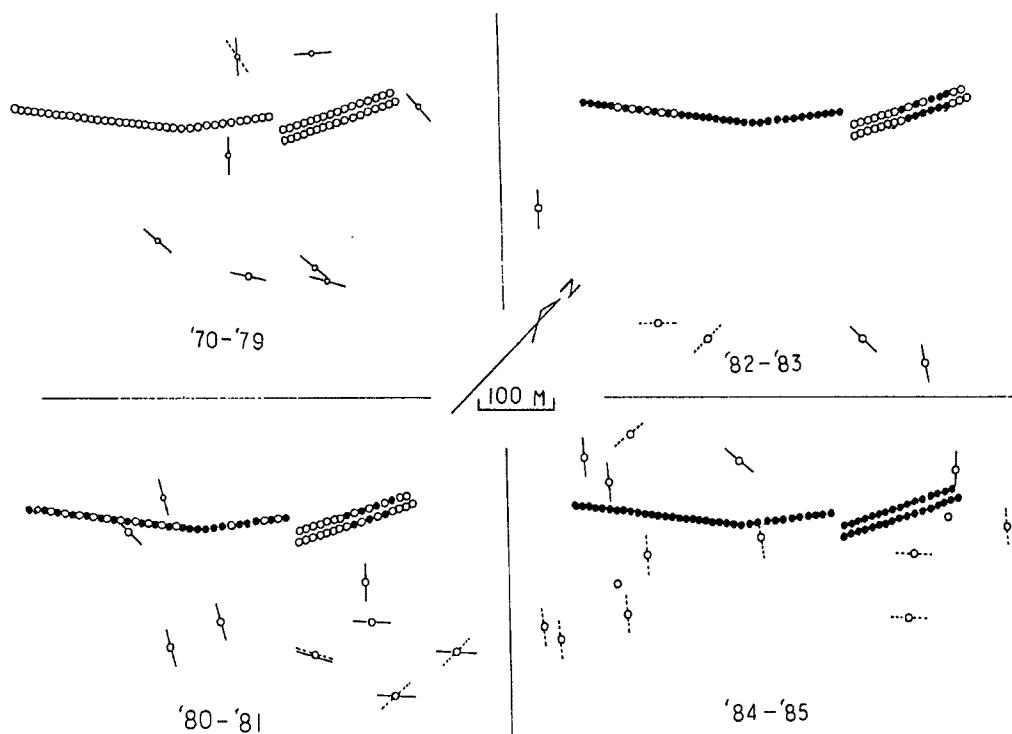


Fig. 11. Distributions of cracks and completed long concrete piles for each time of observations. ● and ○ marks show completed long concrete pile and uncompleted it, respectively. —○— and ---○--- marks show cracks with deep depth and it with shallow depth, respectively.

認められる。

このような浅い crack 群の形成を模式的に Fig. 12 に示す。すなわち、これは、深礎列の工事が進行するにしたがって、これまでの地すべり運動が停止する一方、深礎列の大和川側では新たな上部層の局所的な地すべり運動のきざしが生じていると推測される。

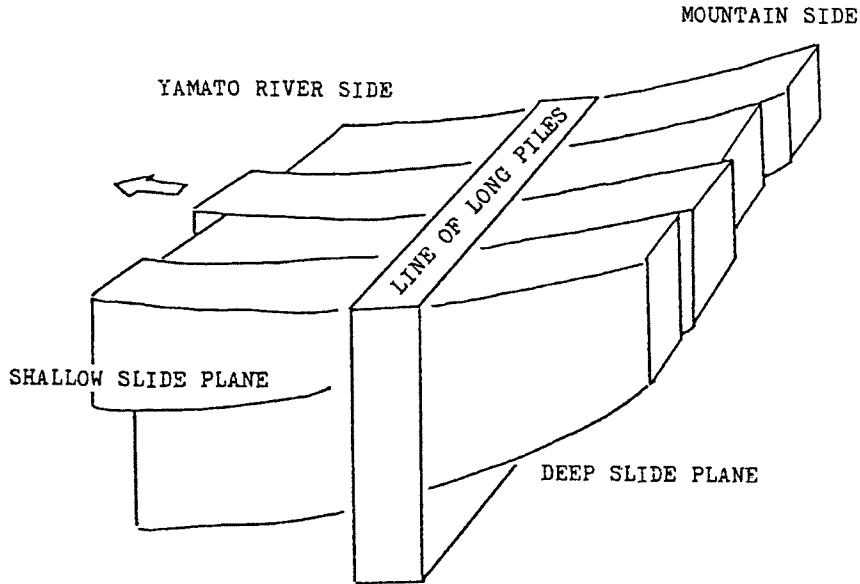


Fig. 12. Illustration of cracks generated with shallow depth at the Yamato river side after the construction of line of long concrete piles.

4. ま と め

亀の瀬地すべり地域での1971年から今日までの20回以上の雑微動の観測結果を要約すると以下である。

1) 亀の瀬地すべり地域では、ここに分布する crack 群が雑微動に強く影響していることが示され、そしてこの crack 構造は模式的に倒立板バネで近似できることが示された。

2) 1)の結果に基づいて観測を続けた結果、crack 群は系統的に分布していることが知られ、地すべり運動の流れの方向が推測された。

3) 地すべり防止対策工事の進行により、雑微動の観測結果に変化が認められて、新たな crack の形成が推測された。すなわち、排土工事の結果、その付近では新たな崖状 crack の存在が推定された。また深礎列の完成によりその大和川側にはこれまでの深い crack の約7割程度の浅い crack が新たに形成されていると考えられ、ここでは新たな局所的な地すべり運動のきざしが推測された。

最後に観測に便宜を計って下さった建設省大和工事事務所関係各位に感謝します。また有益な助言をいただいた古沢保助教授、そして観測に協力していただいた藤田安良技官に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 近畿地方建設局大和工事事務所，亀の瀬地すべり調査報告書（その3）1968，pp. 8-9.
- 2) Wada, T., K. Kamo, T. Furuzawa, K. Onoue: The observation of Microtremors Correlated with the Existence of Cracks at the Landslide Area, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 21, Part 3, 1972, pp. 217-226.
- 3) 和田卓彦・加茂幸介・古沢 保・尾上謙介：地すべり地の Crack 群の雑微動に対する影響，地震，第2輯，第26巻，1973，pp. 316-325.
- 4) 古沢 保・尾上謙介：雑微動の長期安定性について，京大防災研年報，第26号 B-1，1983，pp. 53-62.