

2. 地震に伴い不安定化した斜面の挙動

Motion of unstabilized rock slope after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

中川 渉, 山田政典, 堀伸三郎, 本庄 充
Wataru Nakagawa, Masanori Yamada,
Shinzaburo Hori, Mitsuru Honjo

Abstract

The Hyogo-ken Nanbu Earthquake taking place on January 17, 1995 caused the hillside slope around the summit of Mt. Rokko, to unstabilize, manifesting the following four characteristics:

- 1) The destructed precipice was intermittently separated in several striations with linear development, showing unclear geographical change at the bottom edge and side edges of the unstabilized rock slope.
- 2) There was a tendency of convex deformation at the center of the unstabilized rock slope in which the horizontal displacement was most significant.
- 3) Numerous discontinuous surfaces were recognized toward the depth and each discontinuous development indicated motion in varying directions.
- 4) Each discontinuous surface developed intermittently and were dominated by existing cracks.

This slope resembles the initial slope motion geography as indicated in Oyagi (1996), in which the earthquake caused geographical deformation, and became a major factor at the initial stage.

1 はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、六甲山地周辺に多くの斜面崩壊を誘発し、その数は748箇所以上にも及ぶことが報告されている(沖村, 1995)。

これらの斜面崩壊は小規模かつ急速な崩壊であるといわれている(例えば, 沖村1995)。しかし, 少数ではあるが, この地震によって, 規模が大きく比較的深い深度にまで不安定化した斜面が認められ, それらの中には, 地震後も緩慢な地すべりの活動の継続しているものがある。六甲山頂の北東500m付近の山腹斜面に発生した斜面の不安定化はその一例である。当斜面について, 今回の地震後に斜面に発生した変状(地表面構造)を踏査, 観察し, 測量・図化するとともに, 斜面の動態観測を行った。これらの結果は地震動によって不安定化した岩盤斜面の運動の進行, 変化を知る上での貴重な資料となるものと考え, ここに報告することとした。

2 地形・地質

ここで報告する斜面の位置は, 六甲山頂(標高931.3m)の北東500m付近から北へ伸びる尾根部(標高780m~790m)の西向き斜面であり, 六甲山頂付近に断続的に認められる遷急線をまたいでいる(図-1参照)。この遷急線は, 六甲山の上昇に伴い形成された浸食前線と考えられ, その上位の緩傾斜面付近の岩体は長い地質期間の風化により深部までマサ化している。一方, 遷急線より下位の急崖斜面は, 節理沿いの緩みが発達する風化程度の低い岩盤よりなっている。

当斜面の地質は, 中生代白亜紀に貫入した六甲花崗岩であり, 斜面下部の露頭に発達する緩んだ節理面には, 斜面に対し高角度で流れ盤状(N20° W, 75° W)を呈するものと低角度で受け盤状(N35° W, 20° E)を呈するものが卓越する。この節理の走向・傾斜は, ボーリング孔を用いたボアホールカメラの観察結果においても確認されており(5節参照), 今回発生した崩壊の形態

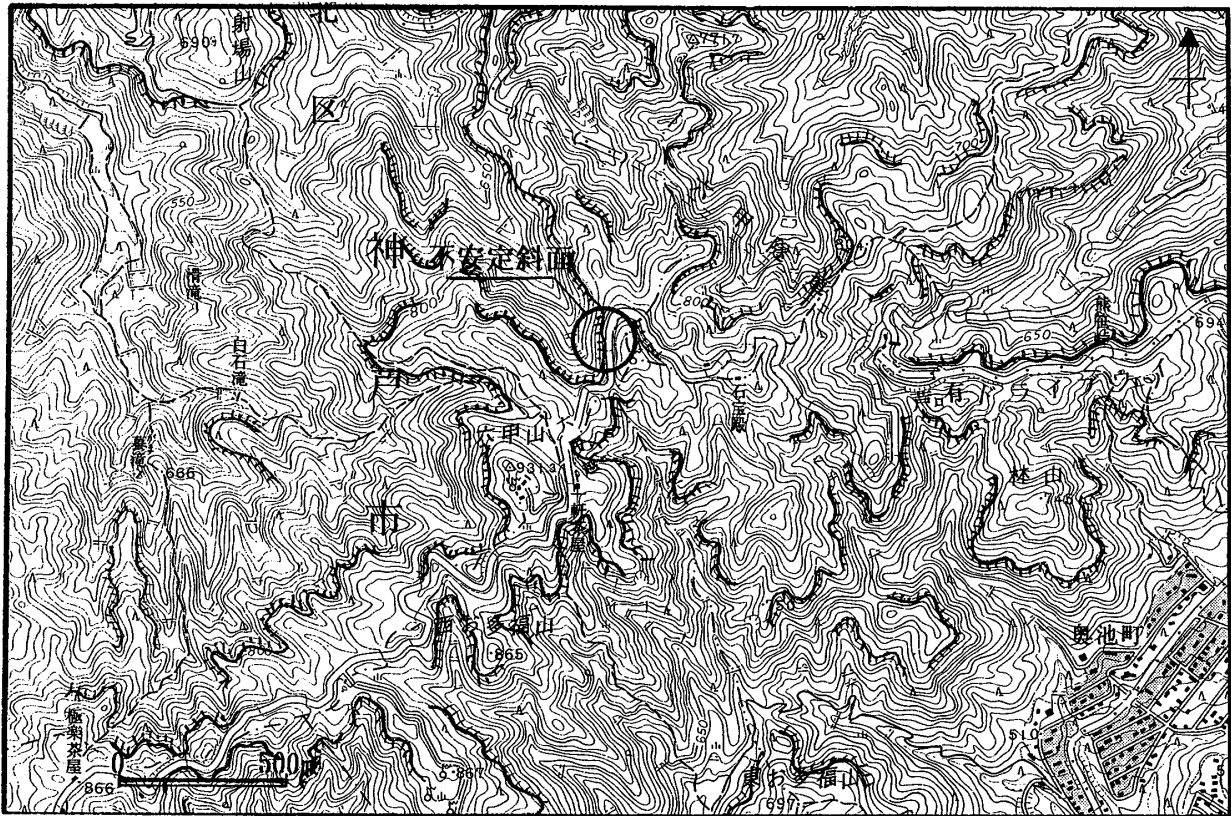


図-1 不安定斜面と遷急線の分布

Fig.1 The station of unbalanced slope and distribution of knick lines.

を規制する大きな要素となっている。

なお、斜面表層には、地震前から高角、低角の節理に起因すると考えられるくさび状の小崩壊による溝状の小さな谷状地形が認められている。

3 斜面の不安定化の範囲

ここで扱う不安定化の範囲は、地震後の踏査により斜面亀裂、微小崖、せん断面等の変形構造が連続的ないし断続的に認められた範囲とする。図-2に今回認められた斜面の地表面変形構造を示した。顕著な変状は斜面上方からの巨礫の崩落、擁壁の変状、道路面の陥没などである。斜面中腹部に位置する道路面では、アスファルト部にせん断的な横断割れ目が発達し、その水平変位を累積すると延べ100cm程度の水平変位に達している(図-3参照)。

斜面上部には滑落崖をなす段差50cm程度の直線的な開口クラックが断続的に認められる。これらの滑落崖は尾根の背後にも見られ、尾根をまたいで形成されているものもある。また、最も変状が激しい道路陥没部の上方斜面には多くの開口クラックが発達し、落差1~2mの滑落崖が認められる。現道路下部の急斜面では、節理が

開口しており、この開口の顕著な部分ではトップリング型の小規模な崩壊が地震以降も進行している(写真-1参照)。

上記の変状分布から今回の地震による斜面の不安定化の範囲は、幅160m、斜面長180mとなり、六甲山系で報告されている地震による斜面の不安定化箇所の中では最も大きいものの1つといえる。

4 斜面の不安定深度

図-4にa-a'測線の地質断面図を示した。ボーリング調査によれば道路下方の斜面には、比較的硬質の「CL」~「CM」級の黒雲母花崗岩が分布している。一方斜面上方では深度20m付近まではマサ化し脆弱化している。

1995年5月から開始した孔内傾斜計観測によるとB-1号孔で深度20m付近と深度34.5m付近に変形が認められ、深度34.5m以深は、1995年7月からゾンデの挿入が不可能となっている。この深度のコアには高角度の割れ目に伴い薄い黒褐色化したスリッケンサイドが認められ、新鮮な剥離性のクラックをともなう。また、その下位には約60°の割れ目に厚さ10cmの固結した粘土混じりの小

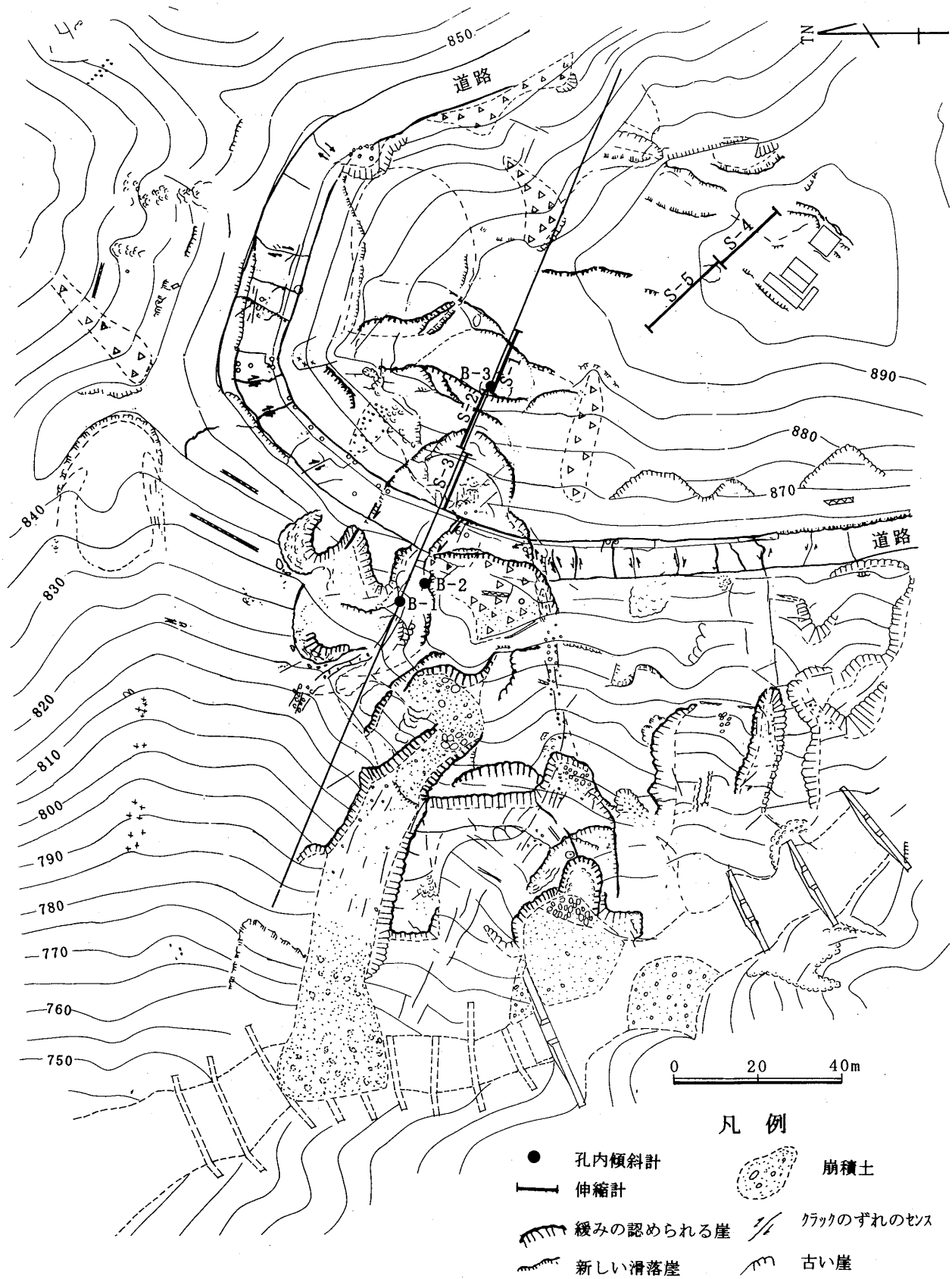


図-2 クラック分布及び観測地点

Fig. 2 Distribution of cracks and the locations of monitoring devices.

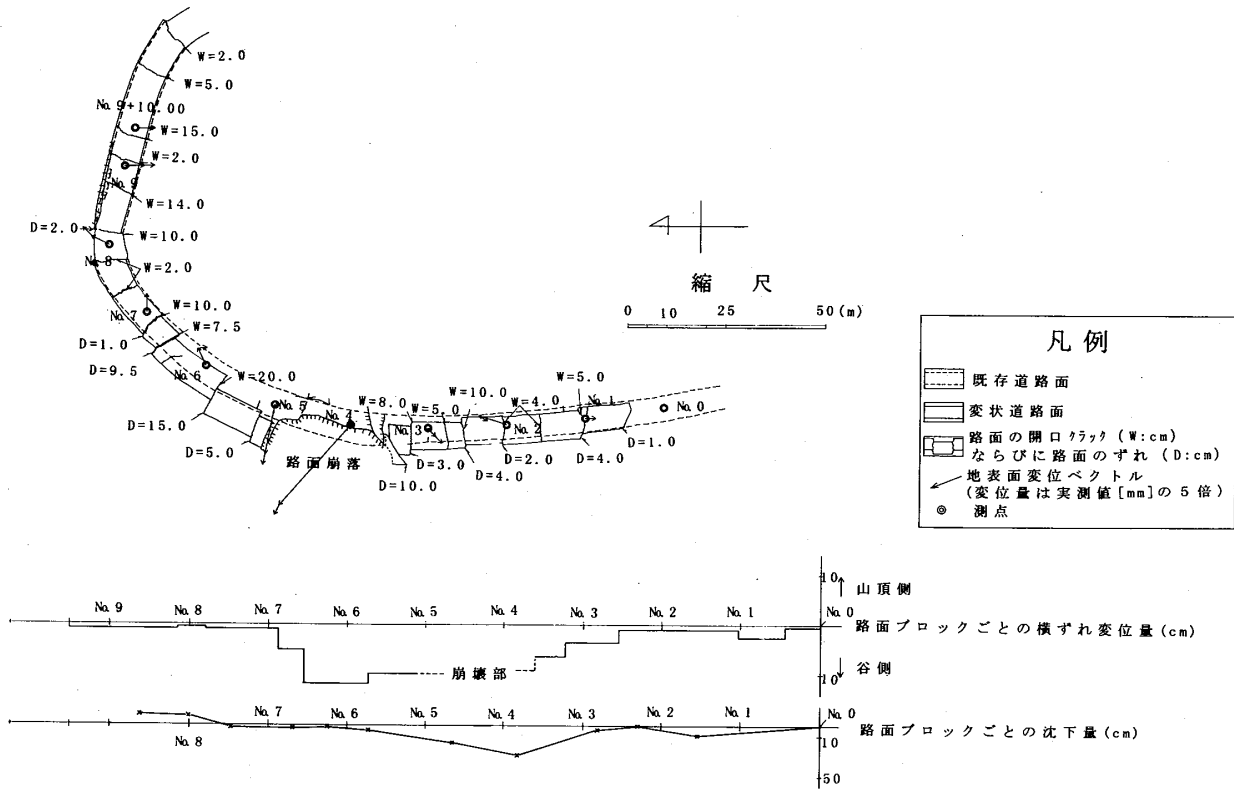


図-3 道路面の変状と変位
Fig.3 Deformation and displacement of road-surface.

角レキが狭在するが、連続性は認められない。斜面下方での地形変状は不明瞭であるが、露頭では割れ目が開口し、局所的な崩壊が認められる。孔内傾斜計の不連続面と斜面表層部に認められる変状舌部とを結ぶ直線は約20°の傾斜角である。

5 割れ目の構造

図-5は当斜面表層部に分布する花崗岩の系統的な割れ目の走向傾斜ならびにB-2号孔のボアホールカメラ観察による割れ目の走向傾斜をシュミットネットに示したものである。

割れ目は変状地形部の斜面表層では、N21° W, 74° Wの高角度の流れ盤傾斜とN35° W, 21° Eの低角度の受け盤構造を示すものが卓越している。特に高角度の割れ目は平行性と連続性を有し、かつ、開口している。この系統の割れ目によって、長方体の崩壊寸前の分離岩塊となったものが多い。

ボーリング孔の割れ目は、N20° W, 73° Wの高角度のものと、N19° W, 27° Eの低角度のものが卓越している。したがって、斜面表層と斜面深部の割れ目の走向傾斜は概ね一致し、斜面(斜面の走向はほぼ東西)全体において高角度の流れ盤構造、低角度の受け盤構造の2方向の卓越した亀裂が分布することが明らかである。

図-6に、B-2号孔のボアホールカメラによる深度別の割れ目の分布と累積開口量曲線、累積亀裂本数曲線を示した。深度35mよりも上方で、亀裂の開口量、本数が急激に増大している。また、亀裂の増大するゾーンには低角の亀裂が多く認められ、これらの亀裂には、節理とは異なる亀裂面の粗い比較的新鮮なものがあることから、地震後に形成されたものと考えられる。

6 斜面の変形

地震により不安定化した斜面の地震後の動態を把握するため、表層および地中で変位観測を行った。表層の変位観測には伸縮計、地中の変位観測には孔内傾斜計を使用し、1995年5月から1995年7月まで観測した。

6・1 地表面の変形

伸縮計による地表面変形の観測は、地すべり頭部の滑落崖付近における2測線で実施した(図-2参照)。その結果を図-7に示した。頭部付近に設置した伸縮計S-1, S-2, S-4およびS-5はいずれも伸び変形を示している。いずれも降雨と関連しているが、余震に際しては顕著な変位は認められていない。これらに対し、擁壁部に設置した伸縮計S-3のみは、縮み変形を示した。これは、擁壁背後の斜面表層が滑動したための局所的な圧縮を示



写真-1 斜面舌部付近のトップリング寸前の岩塊
Fig.1 Block just before toppling around tongue of slope.

すものと考えられる。

6・2 斜面深部の変位

孔内傾斜計による斜面深部の変位観測結果として、B-1号孔の深度別累積変位図を図-7に示した。孔内傾斜計の変形は、堀ほか(1982)が報告した多すべり面型の地中変位を示している。特に、深度20~21m, 深度34.5~38.5mの2つの深度に不連続帯が分布することが明らかである。

深度34.5m付近の変形には、せん断を伴うやや座屈的な傾向が認められる。変形部のボーリングコア状況から、不連続面付近の変形を推定すると、硬質の棒状コアの間に挟まれる約60°の高角の割れ目に沿った礫混じりシルトや礫状部において変形していることが認められる。図-

8には深度34.5~38.5m付近の変形状況を示した。ケーシングの変形イメージは、コアに認められる割れ目が、斜面に卓越する高角度割れ目に平行していると仮定して推定したものである。

また、深度34.5m付近の変位は、平成7年7月15日にX軸方向(N38°W)で谷側へ4.89mm, Y軸方向(N52°E)で下流側へ1.26mmとなっており、移動ベクトルはN24°W方向(下流側)への変形を示している。

平成7年7月19日における深度20m付近の変位は、X軸方向へ0.81mmの変位を示すものの、Y軸方向への変位は認められない。したがって、この深度付近の移動方向はN38°W方向である。また、表層部の深度2m付近では、大きく谷側、上流側への変形を示している。

斜面の最大傾斜方向はおおよそ東西方向であり、孔内

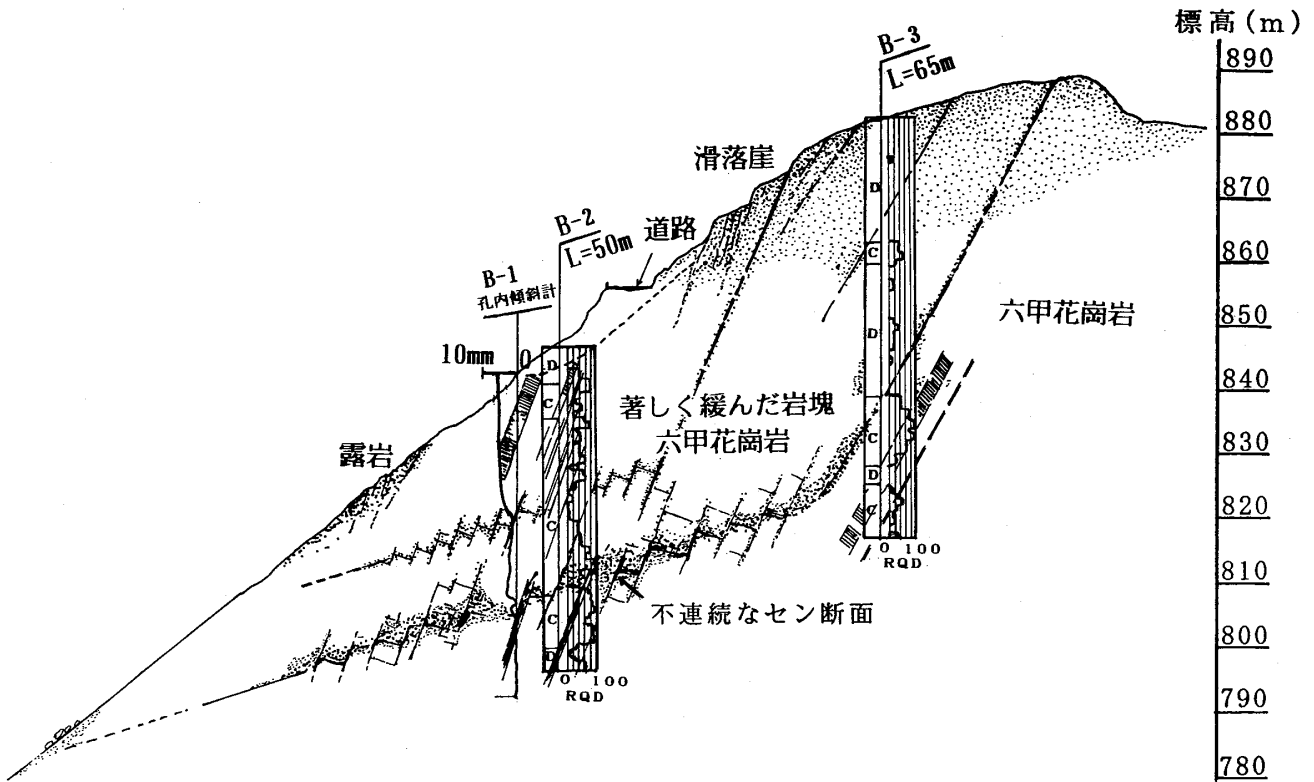


図-4 主測線断面の地質断面図
Fig.4 Geological section of a-a' profile line.

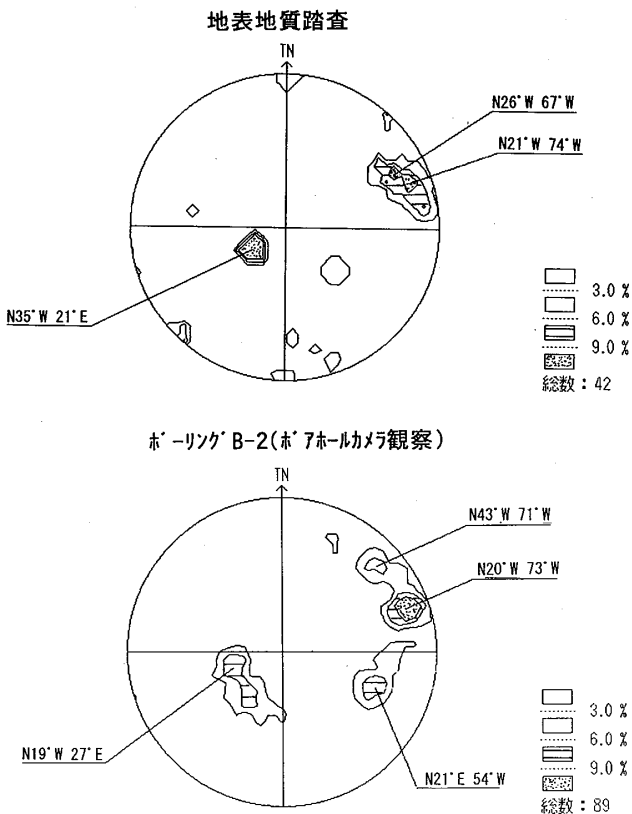


図-5 地表地質踏査, ボーリング孔による割れ目分布
Fig.5 Distribution of cracks for the outcrop and bore hole-observation.

傾斜計の移動方向は、斜面に対し大きく斜交する。

なお、これらのせん断面での変形は、降雨による不連続な変位が累積する傾向がある。

また、B-1号孔より7.5m離れたB-2号孔では孔内傾斜計の初期値測定時(平成7年3月)に深度29.5mでゾンドの挿入が不可能となっている。

7 斜面の不安定化機構

当該斜面で発生した斜面の不安定化は、変形の過程において次の4つの特徴を有している。

- 1) 斜面上部の滑落崖は一連の連続したものは認められない。長くとも20~30m程度であり、断続的に数条に分かれて発達している。また、変形地形の下端部や側端部では、露頭に新鮮な開口亀裂などが認められるが、地形の変化は不明瞭である。
- 2) 変形地形の側端部はアスファルトにせん断的なクラックが発達するのみで、自然地形部には明瞭な変状は認められない。道路面のアスファルトの変位から、変形地形中央部付近に水平変位が大きくなる傾向が認められる。この表面変形は凸型を示している。
- 3) 移動体の地質構造は高角の流れ盤構造と低角の受け盤構造を示す節理に規制されているにもかかわらず

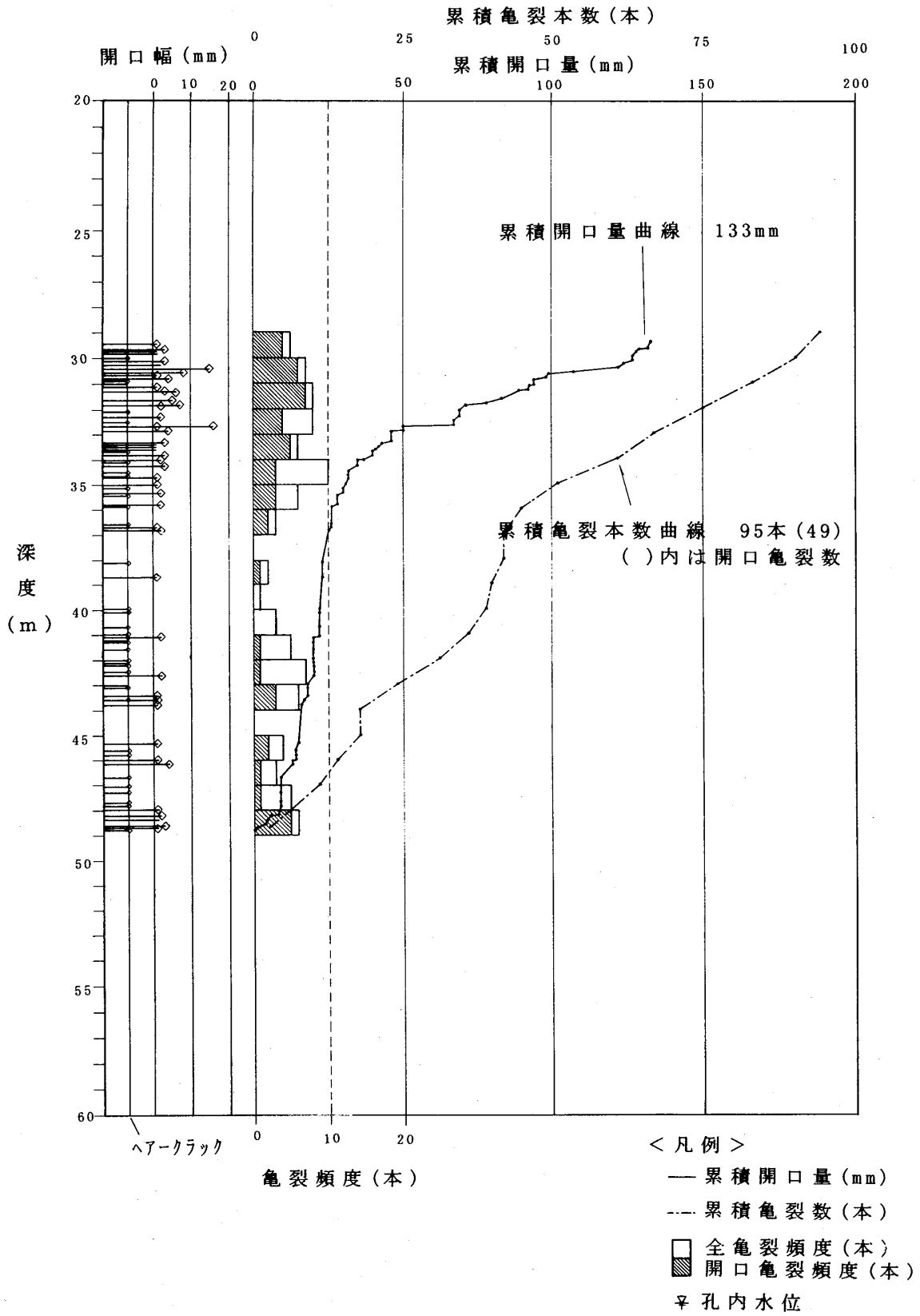


図-6 B-2号孔における深度別クラック分布
Fig.6 Distribution of crack with depths.

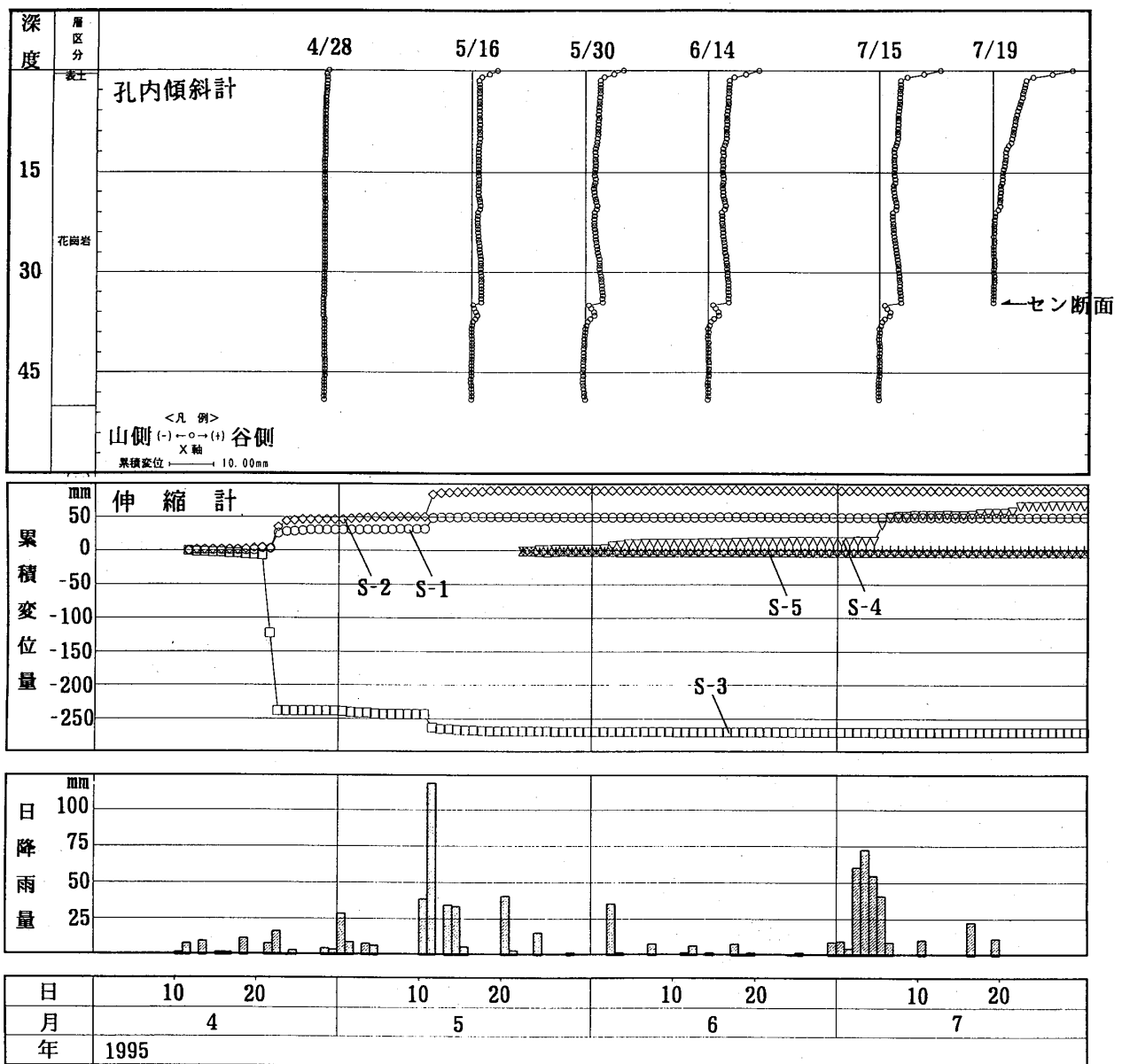


図-7 伸縮計, 孔内傾斜計の観測結果
 Fig.7 The results of monitoring for slide sensor and inclinometer.

ず, 深部での移動方向は節理方向に平行し, 斜面最大傾斜方向と斜交する。

また, 複数の不連続面が深度別に確認され, 各々の深度で移動方向が異なっている。しかしながら, 表層部では斜面の最大傾斜方向への崩壊や変形を示している (図-9 参照)。

4) 変形土塊の破壊面は必ずしも直線的に連続したすべり面形を示すものではなく, 割れ目に規制された断続的な運動形態を示すと考えられる。

これらの特徴をふまえ, 当斜面における変形地形の発達過程を3つのステップに区別して図-10に示した。

① 斜面の初期状態は, 対象となる変形地形の外側な

らびに変動土塊以深の割れ目構造にみられるように高角の流れ盤状の節理と低角の受け盤状の節理が発達する斜面である。斜面には溝状谷地形に見られる浅層部のくさび破壊が生じている状況である。また, 地形的に遷急線をまたぐ位置にあり, 浸食前線の最先端部に位置している。これは周辺部に小崩壊地形が複数分布している状況からも推定される。

② 地震発生直後の状況は, ボーリング試料やポアホールカメラに認められる新鮮な引っ張り亀裂や破壊面周辺に低角の新鮮な亀裂が集中すること (図-6 参照) から, 地震動により, 破壊面周辺に複数の低角の亀裂が形成され, 既存の亀裂を開口させるような

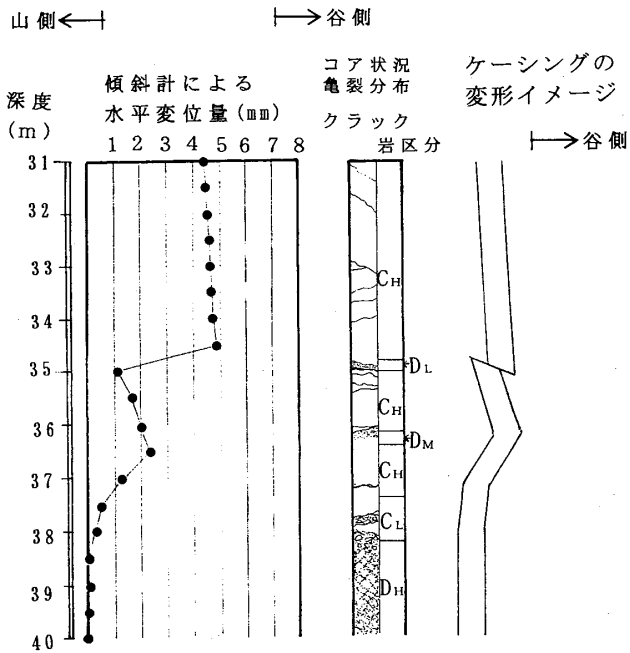


図-8 B-4号孔の孔内傾斜計による水位変位とコア状況による変形イメージの推定

Fig. 8 Horizontal displacement by inclinometer in B-4 bore-hole and deformed image by core observation.

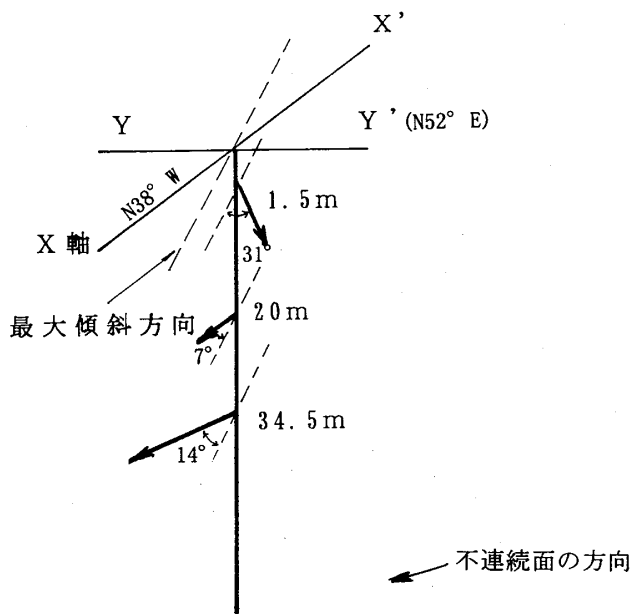


図-9 孔内傾斜計による不連続面の移動方向
Fig. 9 Moving direction of discontinuity by the inclinometer.

斜面変形が生じたと考えられる。あわせて、滑落崖が卓越性のある節理にはほぼ平行し、断続的な発達を示していることから、この激しい地震動にともない既存割れ目の相対的な動きにより、段状の滑落崖が形成されたと推定される。

③ 地震後、地震動により緩んだ斜面はクリープし、

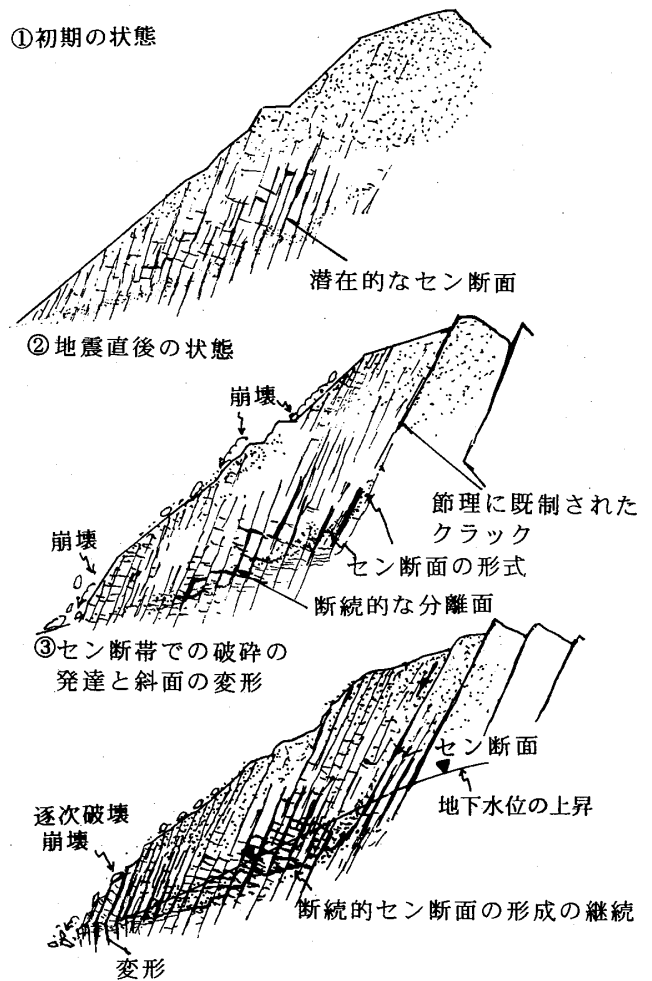


図-10 岩盤斜面変形の発達
Fig. 10 The development of collapsed rock slope.

さらに緩みが進行するとともに滑落崖が後退する。孔内傾斜計の不連続帯部の移動方向や、道路面の変形方向が相異なること(図-3参照)から、移動体内部においても深度別の分離岩塊が独自の変形を示し、地形変形が進行しているものと考えられる。

破壊面は、直線的に連続した地滑り面となるのではなく既存割れ目に支配され、断続的かつ部分的にすべり破壊を生じ、斜面クリープが発達していると考えられる。一方、表面の急崖部や緩み箇所では崩壊を繰り返し、転倒や滑りなどの局部破壊が進行している。

一般に、地すべりは発生した場所によって初生すべりと再発地すべりに分けられる。初生すべりは地すべり経験のない岩盤斜面に発生し、しばしば岩盤地すべりと呼ばれ、場所的予測さえも困難とされている(古谷, 1996)。大八木(1996)は初期的斜面運動地形の特徴として、二重山稜あるいは多重山稜、斜面地形が凸型の縦断、横断地形の尾根型斜面であること等を報告している。また千

木良 (1995) は岩盤クリープについてその内部構造を明らかにしている。当該地斜面の変形は、地形ならびにすべり面の発達状況から考えて、変形地形の初期段階に相当すると考えられる。

Zichinsky (1966) は地すべり発生の初期状態として“Sakungen”を報告している。これは現象が生じている斜面の上部では岩盤内にセン断破壊が生じ、変位した弧状の小崖が形成される。これに対し斜面下部では地形の変化が不明確で、変位している範囲がはっきりしないが、地中内部ではセン断破壊は存在しないもののはっきりと変位のみが認められる地形変動である。

当斜面で発生した斜面の不安定化の現象は、斜面頭部において、弧状ではなく断続的、直線状の小崖を形成している。しかしながら、斜面下部や側部での地形が不明瞭なことや地中変位が確認されていることから、“Sakungen”の一つと考えるもよいのかもしれない。

また、今回の地震において尾根部に形成された線状凹地は、小崖地形 (Sacarplet) や二重山稜に相当し、従来考えられていた組織地形、重力クリープのみならず地震が岩盤クリープ形成に大きな誘因となったことを示していると考えられる。

ここで扱った斜面は、地震時に発生した斜面の変状ブロックとしては比較的大きいものであり、地震後も緩慢な活動を継続している変状斜面としては数少ないものの1つである。また、斜面の地質構造を把握し、継続した動態観測が実施できた斜面としては貴重なものであると考えここに報告した。

参 考 文 献

- 沖村 孝 (1995) : 兵庫県南部地震に伴う斜面崩壊の特性, 兵庫県南部地震に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書, 地すべり学会, pp1-15.
- 堀伸三郎, 成田 賢, 井上芳幸 (1982) : 孔内傾斜計観測結果から見た地すべりの挙動, 応用地質調査事務所年報, No. 4, P1~P18.
- 大八木則夫 (1996) : 福井県大野盆地南東部周辺地域の大規模崩壊・地すべり地形と堆積物について, 深田地質研究所報告. No. 10.
- 千木良雅弘 (1995) : 風化と未来, 近未来社.
- 古谷尊彦 (1996) : ランドスライド, 古今書院, P86~P87.
- Zichinsky (1996) : On the deformation of high slopes. Proceedings of the 1st Congress of the Int. Soc. of Rock Mechanics, Lisbon,