

## ◆ 防災特集 ◆

## 現地載荷による地すべりの移動特性に関する考察

石井靖雄\* 綱木亮介\*\* 淺野広樹\*\*\* 杉本宏之\*\*\*\*

## 1. はじめに

地すべり現象は、一般にがけ崩れと比較して規模が大きく、地盤が変質作用を受けたり断層運動に伴い破碎されるなど複雑な地質構造からなる地域で発生することが多い。さらに、移動に伴い土塊が破碎されるため、室内実験での地すべり現象の再現には困難な面がある<sup>1)</sup>。そこで、適切な斜面安定度評価手法の検討に役立つデータを得るために、自然斜面において盛土の載荷により強制的にすべり変位を生じさせる実験を行った。

本報では、載荷時の斜面の移動特性を明らかにするため、実験で得られた多層移動量計、垂直伸縮計、地盤伸縮計等の観測結果より、載荷に伴う圧縮沈下及び地すべり運動の発生状況を考察した結果を報告する。さらに、複数の観測データの比較により載荷、除荷による変位の伝播特性についても考察したのであわせて報告する。

## 2. 実験地の概要

実験地は、新第三紀層の泥岩・凝灰岩の分布域に位置する幅約50m、長さ約60mの斜面である(図-1)。南東から北西に伸びる尾根の南西斜面にある実験地の両側には崩壊跡が認められる。また、実験斜面の上部には平坦面が形成され、明瞭な遷急線、遷緩線が認められる。

実験に先立ち実施した調査ボーリングの結果、実験地の地質は、凝灰岩、凝灰質泥岩、泥岩・凝灰岩互層からなり、地表から5~10mの深度は風化が著しかった(図-2)。ボーリングコアの観察の結果では、明瞭な滑動の痕跡は認められなかったが、風化の著しい部分(W1)の下面、もしくは下部の凝灰岩層の一部粘土化している部分がすべり面を形成すると想定された。

## 3. 実験方法及び実験結果の概要

実験は、図-3に示すフローにしたがって行い、

Characteristics of Landslide Movement during Filling Observed through Field Loading Test

表-1に示す地盤伸縮計、設置型孔内傾斜計、多層移動量計等の計測機器を実験斜面に設置し、自動観測により地すべりの移動状況を常時モニタリングしながら、切土、盛土を段階的に行った。

実験では、切土及び盛土後に斜面内に水を供給して移動させることも計画していたが、盛土前に実施した試験注水の結果、地山の透水性が予想

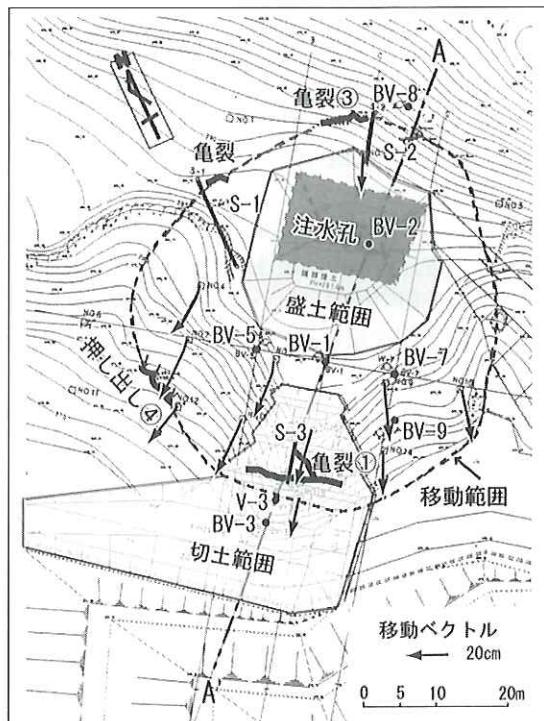


図-1 平面図

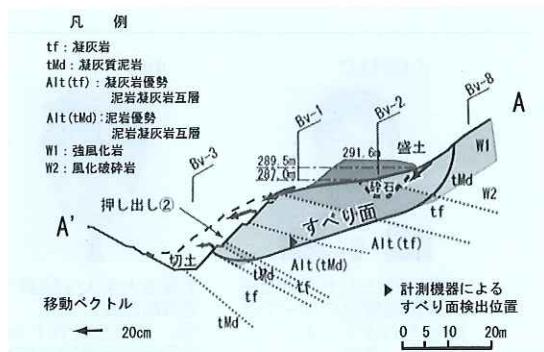


図-2 断面図

以上に小さかったため、頭部への載荷のみによって変位を生じさせる実験とした。

多層移動量計、垂直伸縮計、孔内傾斜計、地盤伸縮計、地下水位計の観測結果を図-4に示し、これらの観測結果から、実験の進行状況と斜面の滑動状況の概況を以下に述べる。

末端部の切土後、予め掘削していた注水孔に碎石を投入した11月1日に孔内傾斜計(BV-1、深度12m)にわずかではあるが累積性のある変位が認めら

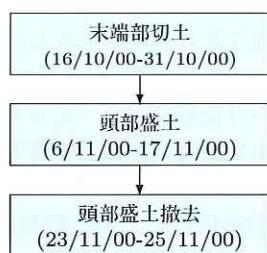


図-3 実験のフロー

表-1 実験地に設置した計測機器一覧

位置	計測機器	
	自動観測	手動観測
BV-1 (W-1)	設置型孔内傾斜計 地下水位	
BV-2 (W-2)	地下水位	多層移動量計
BV-3		地下水位(カード式)
V-3	垂直伸縮計	
BV-5 (W-5)	多層移動量計(2点)	地下水位(カード式)
BV-7 (W-7)	垂直伸縮計	地下水位(カード式)
BV-8 (W-8)		地下水位(カード式)
S-1, 2, 3	地盤伸縮計	
S-3		地盤伸縮計(自記式)

注) BV-4、BV-5は掘削していない

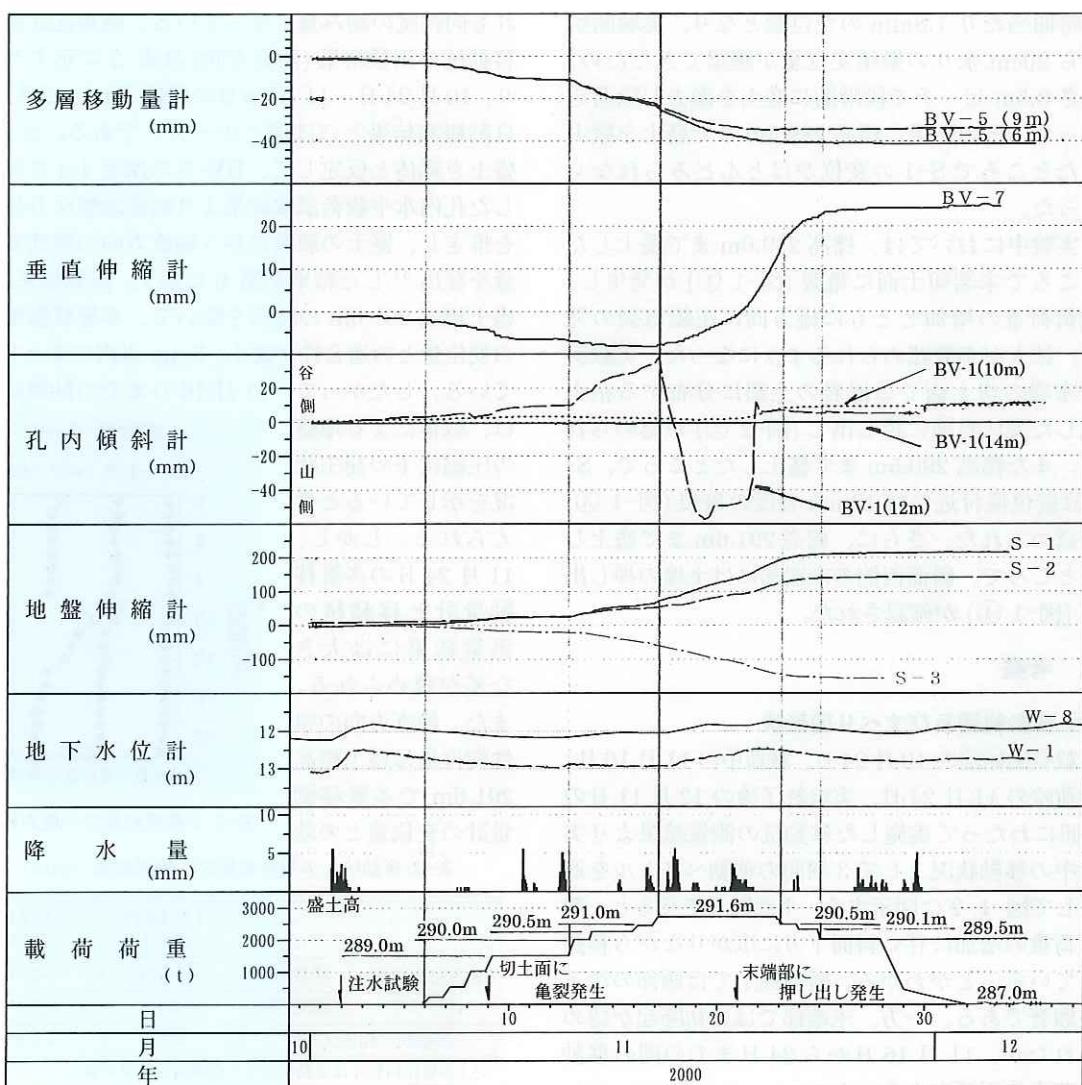


図-4 実験の観測結果

れた。さらに、試験注水を実施した11月2日には、地盤伸縮計(S-1)にもわずかではあったが累積性のある変位が認められた。

注水試験の結果、実験地に設置された地下水位計(W-1,8)では、注水前の降雨により水位の上昇が認められていたが、注水の1日後までに水位がさらに30cm程度上昇し、その後10日間でほぼ元の水位に戻った。

注水試験後、斜面頭部への載荷を開始したところ、さらに、累積性のある変位が認められるようになってきたが、作業を一時中止すると変位の発生も終息する傾向にあった。さらに段階的に載荷荷重を増加させ、標高291.6m(頭部の元地盤高さは標高287m)まで盛土したところで変位速度が定常～加速傾向となった。最終的にS-1において時間当たり1.8mmの変位量となり、実験開始から20cm余りの累積変位量が確認できたため、高さ0.5mピッチで段階的に盛土を撤去し除荷を行った。その結果、標高289.5mまで盛土を撤去したところでS-1の変位がほとんどみられなくなった。

実験中においては、標高289.0mまで盛土したところで末端切土面に亀裂(図-1①)が発生し、載荷荷重の増加とともに縦方向に圧縮亀裂の発生、拡大が多数認められるようになった。実験斜面末端の切土面では泥岩の上部に分布する粘土化した凝灰岩部に押し出し(図-2②)が認められた。また標高290.5mまで盛土したところで、S-2設置位置付近に幅10mm程度の亀裂(図-1③)が認められた。さらに、標高291.6mまで盛土したところで、斜面西側の末端部には土塊の押し出し(図-1④)が確認された。

#### 4. 考察

##### 4.1 移動範囲及びすべり面形状

載荷開始前の10月24日、載荷中の11月16日、除荷時の11月24日、実験終了後の12月11日の4回にわたって実施した移動杭の測量結果より実験中の移動状況として3期間の移動ベクトルを連結して図-1,2に図示する。平面図上で見ると、載荷荷重の増加に伴い斜面下方に広がりながら移動していることがわかる。断面図上では頭部の沈下が顕著である。一方、末端部では当初隆起が認められたが、11月16日から24日までの間の移動は若干沈下傾向となった。

これら移動杭の測量結果や地表面の変状、3Dレーザースキャナーによる計測結果<sup>2)</sup>より、移動範囲は図-1に示す範囲と推定される。すべり面は、パイプ歪計、孔内傾斜計等の観測結果、移動杭測量結果及びボーリングコアの観察結果より、図-2のとおり風化の進んだ部分(W1)の下面に形成されたと推定される。末端部では、比較的堅硬な凝灰岩があつたため、上向きに跳ね上がったすべり面形状になったと考えられる。

##### 4.2 載荷に伴う圧縮沈下の発生状況

多層移動量計(BV-5)の深度6m及び9mの自動観測による連続観測結果(図-4)をみると載荷とともに縮み(負値)が生じている。図-5に示す全深度の観測結果では11月16日、12月11日に大きな変位が認められるが、9mより上部はいずれも同程度の縮み量となっている。観測孔近傍の移動杭の測量結果(鉛直方向)は表-2に示すとおり、10月24日～11月16日の間は25mmであり、自動観測結果とほぼ同じオーダーである。また、盛土を剛体と仮定して、BV-5の深度4mで実施した孔内水平載荷試験結果より鉛直地盤反力係数を推定し、盛土の載荷に伴う鉛直方向の弾性変位量を算出<sup>3)</sup>した結果を図-6に示す。計算結果は、盛土標高291.6mの時点を除いて、多層移動量計の変位量との適合性が良く、5mm以内の差となっている。したがって、11月16日までの計測結果は、載荷による地盤の圧縮沈下の発生状況を示していると考えられる。しかし、11月24日の多層移動量計と移動杭の測量結果には大きな差が認められる。また、鉛直方向の弾性変位量は盛土標高291.6mで多層移動量計の変位量との差

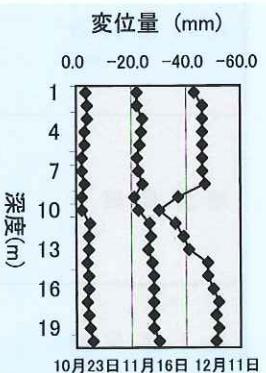


図-5 多層移動量計の観測結果

表-2 移動杭と多層移動量計の観測結果 (mm)

	11月16日 10:00	11月24日 10:00
多層移動量計 (BV-5)	深度6m	-20.9
	深度9m	-20.2
移動杭(鉛直方向)	-25	-105

注)多層移動量計は移動杭測量の作業開始時刻の値  
移動杭は10月24日からの累積値

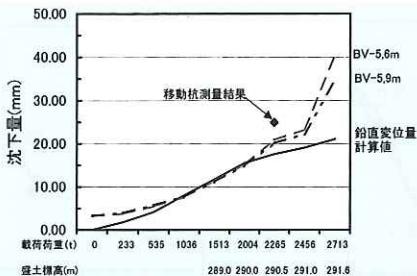


図-6 鉛直変位量計算結果

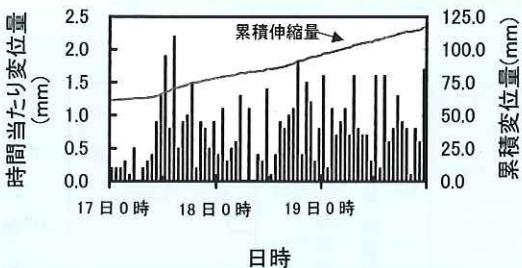


図-7 地盤伸縮計 (S-1) の時間当たり変位量

が大きくなっている。この原因は、圧縮沈下に加えて地すべり運動による変位が発生したためとも考えられるが、今後検討していく必要がある。

また、図-5において、すべり面を挟んでワイヤー線が設置されている場合には、すべり面以深に固定されているワイヤー線では、地すべり土塊の移動量とほぼ同程度の変位量が記録されることが一般的であるが、10m 以深の観測結果は異なる結果となった。この原因については不明であり、今後検討していく必要がある。多層移動量計は観測孔に設置されたワイヤー線の観測孔の変形に伴う伸縮量を計測している。ワイヤー線の伸縮量は、観測の初期においては、観測孔の屈曲により縮みを記録するが、観測孔が一定量以上屈曲すると伸びに転じる。このような多層移動量計（垂直伸縮計も同じ計測原理）の計測機器の特性が観測結果の解釈を難しくしている。

#### 4.3 載荷に伴う地すべり運動の発生状況

地盤伸縮計 (S-1) の変位（図-4）は、全体としては一定の傾向を示しているが、時間当たりの変位量（図-7）は間欠的な変位となっている。このことは、載荷荷重の増加に伴い土塊の破碎が徐々に進み、すべり面が形成されたことを示すと考えられる。

地盤伸縮計の変位は、標高 291.6m まで盛土し後に急速に増加する結果となった。一方、孔内

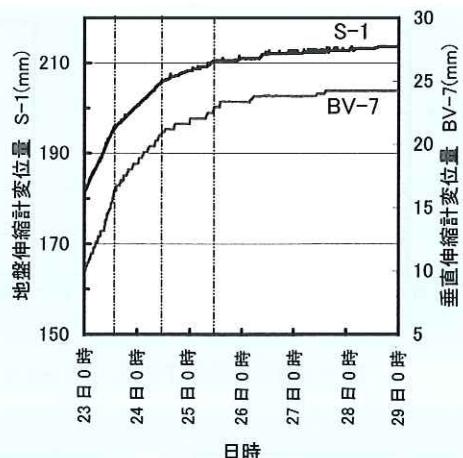


図-8 除荷時の変位速度の変化点

傾斜計の変位は標高 291.6m で一転して山側に急速に変化した。また、垂直伸縮計の自動観測結果（図-4）は多層移動量計と同様に縮みが生じていたが、標高 291.6m まで盛土した時点で、一転して急速な伸びを示した。これらの計測結果より、標高 291.6m まで盛土した時点が斜面安定の極限状態と判断される。

除荷時においては、盛土を 289.5m まで撤去した後に変位がほとんど見られなくなった。すべり面の形成に伴い地盤の強度が低下したため、斜面安定の極限状態が標高 291.6m から標高 289.5m 変化したと考えられる。

#### 4.4 載荷、除荷時の変位伝播特性

地すべり現象は、地中のある深さで何らかの原因により滑動力がせん断抵抗力を上回り破壊が生じ、破壊がある伝播速度を持って伝播し変位が生じる現象<sup>4)</sup>と考えられる。したがって、本実験においても、載荷荷重の増加とともに破壊が伝播し、地すべり運動となると考えられる。そのため、地盤伸縮計等で観測される変位速度は載荷荷重の増減とともに変化し、観測位置によって変位速度が変化する時刻に差が生じると考えられる。そこで、観測位置ごとに変位速度が変化する時刻の差は、載荷条件によってどのように変化するのか、あるいは一定であるのか、その傾向を調べてみた。

実験斜面に設置された観測機器のうち多層移動量計 (BV-5, 深度 6m 及び 9m) の観測結果では、初期の変位を検知した 11月3日のほか、載荷荷重の増加により 11月13日、11月17日においても明瞭な変位速度の変化点が図-4 より判読される。一方、除荷時においては、図-8 より地盤伸縮

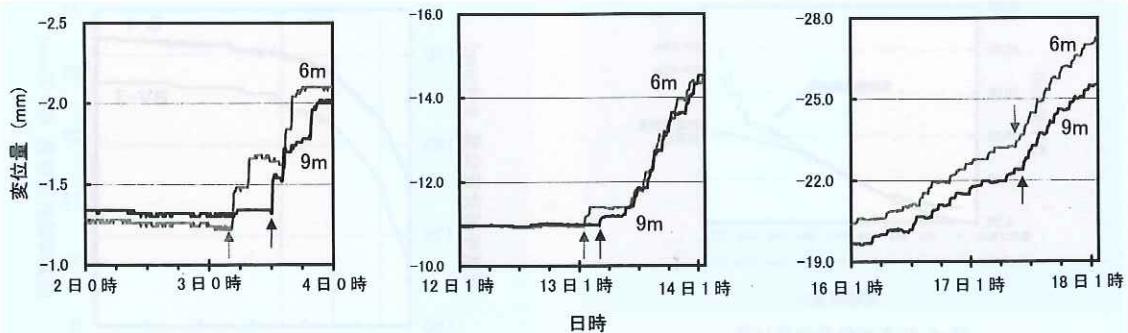


図-9 多層移動量計 (BV-5, 深度 6m 及び 9m) の観測結果 (変位速度の変化点付近をグラフ化)

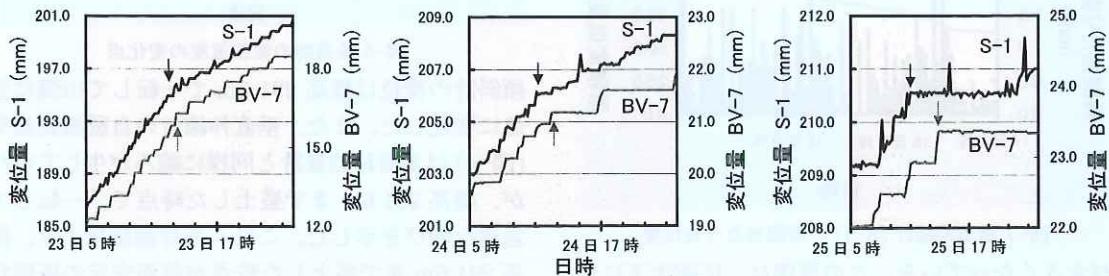


図-10 地盤伸縮計 (S-1)、垂直伸縮計 (BV-7) の観測結果 (変位速度の変化点付近をグラフ化)

表-3 載荷時の変位伝播速度

表-4 除荷時の変位伝播速度

	11月3日	11月13日	11月17日	
変位 伝播 時刻	多層移動量計 (BV-5, 6m)	4:50	2:10	10:10
	多層移動量計 (BV-5, 9m)	12:20	5:10	11:40
変位伝播時間差	7h30m	3h00m	1h30m	
変位伝播速度 (m/h) 6m→9m	0.40	1.00	2.00	

	11月23日	11月24日	11月25日	
変位 伝播 時刻	地盤伸縮計 (S-1)	12:30	11:10	11:00
	垂直伸縮計 (BV-7)	13:20	12:30	13:50
変位伝播時間差	0h50m	1h20	2h50m	
変位伝播速度 (m/h) S-1→BV7	45.6	28.	13.4	

計 (S-1) と垂直伸縮計 (BV-7) の観測結果に変位速度の変化点 (11月 23 日、24 日、25 日) が認められる。変位速度の変化点は、観測機器の設置位置に載荷、除荷の影響が伝播した時刻 (変位伝播時刻) と考えられる。そこで、対象とする 2 つの観測データを用いて、観測機器の設置位置間の距離を変位伝播時間差 (変位伝播時刻の差) で除すことにより変位伝播速度を求め、載荷時及び除荷時の変位伝播特性を考察した。

#### 4.4.1 載荷時の変位伝播時間差

多層移動量計 (BV-5, 深度 6m 及び 9m) の変位速度の変化点は、10 分間隔の観測データを用いて作成したグラフ (図-9) を目視により判読し、多層移動量計の分解能 (0.1mm) 以上の値を記録した時刻とした (表-3)。多層移動量計の設置深度 6m、

9m はいずれもすべり面よりも浅いため、すべり面の変位をとらえているとは言い難い。しかしながら、深い位置ほど載荷による反応が遅く、載荷により土塊内部に働く応力が大きくなるにしたがい、変位伝播時間差が小さくなっている。表-3 は、概ね圧縮沈下の変位伝播速度の変化を示していると考えられる。変位伝播速度は、変位速度が定常～加速傾向に変化した 11月 17 日には、載荷開始前 (11月 3 日) の 5 倍の速度となっている。

#### 4.4.2 除荷時の変位伝播時間差

地盤伸縮計 (S-1) と垂直伸縮計 (BV-7) では、図-10 に示すとおり除荷に伴い変位速度が減少していく傾向がみられた。S-2 では変位速度の変化点は不明瞭であったため、変化点の判読は困難であった。そのため、地盤伸縮計の観測データとし

て S-1 の観測結果を用いて変位伝播時刻を調べた。変位伝播時刻は、多層移動量計と同じ方法により判読している。表-4 に示すとおり、除荷にしたがい変位伝播時間差が大きくなっている。S-1 は亀裂の発生している地すべりの頭部の境界部を挟んで設置されている。一方、BV-7 もすべり面を挟んで計器(ワイヤー線)が設置されている。したがって、表-4 に示す変位伝播速度は、すべり面の変位伝播速度を示すと考えてよい。実験斜面での地すべりの変位伝播速度は、23 日には約 45m/h であったが、除荷により伝播速度が次第に低下し、25 日には約 1/3 の速度となっている。

載荷時の圧縮現象(BV-5)の変位伝播速度は、載荷加重の増加とともに速くなる傾向が認められた。一方、すべり面の変位伝播速度(S-1, BV-7)は、除荷とともに遅くなる傾向が認められた。多層移動量計(BV-5)の観測結果より求めた載荷時の変位伝播速度はすべり面の変位伝播速度を示すものではなく、S-1 及び BV-7 において発生している現象とは異なるため、載荷時と除荷時の変位伝播速度を比較し評価することはできないが、載荷時及び除荷時ともに、斜面安定の極限状態に近いほど変位伝播速度は早い傾向を示している。本実験では、前に述べた垂直伸縮計の計測機器の特性から、載荷時の S-1 と BV-7 の観測結果の比較ができなかった。今後、他の箇所でも調査を行い、すべり面の変位伝播速度の変化を検討していく必要があるが、変位伝播速度の変化は、盛土等による斜面への載荷、除荷による斜面の応力状態の変化や斜面の安定度を評価する材料の一つとなる可能性がある。

## 5. まとめ

自然斜面での載荷による地すべり移動実験で得られた観測結果から載荷による斜面の移動特性を

考察した結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 本実験地では、載荷により圧縮沈下現象とすべり現象が発生し、標高 291.6m まで盛土した時点で斜面安定の極限状態となり変位速度が定常～加速状態に変化した。
- (2) 除荷時には、標高 289.5m まで盛土を撤去した時点で、移動がほぼ停止した。すべり面の形成に伴い、地盤の強度が低下したため、斜面安定の極限状態をもたらす荷重が載荷時と除荷時で異なる結果となったと考えられる。
- (3) 地盤の圧縮現象の変位伝播速度は、載荷にしたがい増加した。一方、地すべり現象の変位伝播速度は、除荷とともに減少し、斜面安定の極限状態に近いほど変位伝播速度が速い傾向があった。

今後、変位伝播特性の検討にあたっては、変位速度の変化点を合理的に判読する方法についても検討を行っていく必要があるほか、載荷によらずに発生する地すべりの特性についても検討を行つて行く必要があると考えている。さらに、垂直伸縮計、多層移動量計、孔内傾斜計の観測結果には解釈の難しい点もあるため、本実験地ですべり面の形成状況を観察する立坑を掘削する際に観測孔の屈曲状況を現地で確認し、さらに検討を行う予定としている。

## 参考文献

- 1) 川邊洋、芝野博文、西尾邦彦、山口伊佐夫：野外実験による地すべり発達過程における地盤の変形特性、地すべり、Vol.27, No.1, pp1-10, 1990.
- 2) 渡野廣樹、綱木亮介、石井靖雄：3D レーザースキャナーによる地すべり移動量計測の検討、第 40 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.279-282, 2001.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編・IV 下部構造編)・同解説, p239, p267, 1999.
- 4) 島通保、末峯章、小西利史：地すべり面における破壊伝播速度について、京大防災研究所年報、第 20 号 B-1, pp199-208, 1977.

石井靖雄\*



独立行政法人土木研究所  
土砂管理研究グループ地  
すべりチーム主任研究員  
Yasuo ISHII

綱木亮介\*\*



同 土砂管理研究グル  
ープ地すべりチーム上席研  
究員、学術博  
Dr.Ryousuke TSUNAKI

渡野廣樹\*\*\*



同 土砂管理研究グル  
ープ地すべりチーム研究員  
Hiroyuki ASANO

杉本宏之\*\*\*\*



同 土砂管理研究グル  
ープ地すべりチーム研究員  
Hiroyuki SUGIMOTO