

# 傾斜計を用いた斜面崩壊早期予測手法に関する研究 —土砂災害消防活動への応用に向けて—

東京消防庁 ○植竹政樹  
(独) 防災科学技術研究所 酒井直樹・福園輝旗

## 1. はじめに

近年、土砂災害警戒情報により土砂災害発生の危険性を市町村単位で住民に情報提供するようになった。しかし、土砂災害は、その警報が発令された全域で起きるわけではなく、一部分の地域・斜面のみで発生するのが通常である。これに対処するためには、今後、さらにきめ細かく個々の斜面ごとの危険性に関する情報の発信が不可欠となる。筆者らは、このためのセンサーとして傾斜計が有効ではないかと考え、検討を重ねている。この種のセンサーは可動部が露出していないので外乱に影響されにくく、また、当該斜面への設置が比較的簡単である。この利点から、土砂災害が発生した際の消防活動における二次災害の監視機器の一つとしても有効利用が考えられる。ここでは、主に、後者に焦点を当てながら、防災科学技術研究所が所有する大型降雨実験施設を用いた実験研究により、傾斜計の有効性を検討した結果の一部を報告する。

## 2. 使用した傾斜計の概要

傾斜計には様々な種類があるが、崩壊時期予測に適用出来る程の精度を持ち、かつなるべく安価なことを条件に、非接触型ポテンショ形式の緑測器製角度センサーを利用して試作した連結型傾斜計を使用した。すなわち、角度センサーを内蔵した外形3cm、長さ9.2cmの円筒状を1単位とし、折れ曲がり可能なようにボルト・ナットで連結したものである。この傾斜計を鉛直方向に埋設することにより、深さ約10cm毎の斜面土層の剪断歪（傾斜量の正接）を連続的に測定することが出来る。有効傾斜角は $\pm 10^\circ$ 、分解能0.01°以下の性能を有する<sup>1)</sup>。

同時に、傾斜計の有効性を検討するための比較データとして、従来使用されている地表面移動計（伸縮計）により、地表面移動量を計測した。

## 3. 斜面崩壊実験—結果と考察

本研究では降雨時に多発する表層崩壊による災害を対象として、斜面形状（規模と角度）と供試土（マサと砂）の異なる模型斜面にて、計7回の崩壊実験を行った。それぞれの実験条件、崩壊時間等の概要を表1に示す。実験では、前述の地表面移動量（地表面変位計：伸縮計）と斜面内部の傾斜変化（内部歪計）崩壊

表1 実験条件と結果一覧

実験No	記号	実験名称	模型斜面の形状(斜面部分のみ)				供試土	水平部の有無	傾斜計の埋設位置(末端から)	降雨条件と崩壊発生		
			高さ(m)	幅(m)	土層厚(m)	角度(度)				降雨強度(mm/h)	崩壊時間(時分秒)	事前降雨(mm)
実験1	d30(マサ4m)	長大30度マサ斜面	7.8	3	1	30	マサ	有	2m	50	2:32:00	-
実験2	b30(砂2m)	大型30度砂斜面	5	4	1	30	砂	無	2m	50	1:50:00	-
実験3	b30(マサ4m)	大型30度マサ斜面	5	4	1	30	マサ	無	4m	50	1:21:00	90
実験4	b40(マサ4m)	大型40度マサ斜面	5	4	1	40	マサ	無	4m	30→50	4:24:00	105
実験5	c30(マサ2m)	中型30度マサ斜面1	3	1.5	0.5	30	マサ	有	3m	50	1:27:00	-
実験6	c30(マサ2m)	中型30度マサ斜面2	3	1.5	0.5	30	マサ	有	2m	50	1:32:00	60
実験7	c40(マサ2m)	中型40度マサ斜面	4	1.5	0.5	40	マサ	有	2m	50	1:37:00	-

に関与すると思われる種々物理量（土壌水分量、地下水位、間隙水圧、土圧、表面移動量、内部変形量ほか）の変化を測定しているが、ここでは、本研究の主題である前述の地表面移動量と斜面内部の傾斜変化（連結型傾斜計）の計測結果を示し、必要に応じて他の物理量の計測結果に言及する。

以下、紙面の都合により、長大斜面と大型斜面での実験結果のみを示す。

### 3. 1 傾斜計の設置位置と角度変化量の関係

図1に長大斜面と大型斜面による実験で、連結型傾斜計により崩壊直前までに計測された深さ毎の傾斜変化量を示す。縦軸は斜面表面から鉛直方向の深さ、横軸は正の値が斜面下部方向への傾きを表している。斜面底面に近い部分の変化量が比較的大きいことがわかる。この部分は最終的にすべり面を形成する付近であるため、b40（マサ・4m）とd30（マサ・4m）では負の方向にも角度の変化量が大きくなっている。なお、b30（砂・2m）は斜面底面の角度変化量が小さいが、次章で述べる理由による。また、中型斜面での計測結果では、斜面底面で角度変化量が大きいのは同様であるが、傾斜角が大きい斜面では表面付近の土砂における傾斜変化量が大きく、土層の中間層では角度の変化量は比較的小さくなるという結果が得られている。以上のことから、斜面深部のすべり面付近に設置する事により、最も変化量の大きいデータを得られるが、傾斜が急な場合には斜面表面に近い付近でも比較的变化量の大きいデータが得られる場合もあることが分かった。

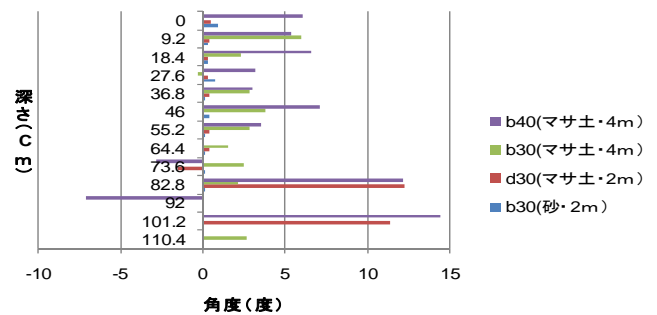


図1 深さ毎の傾斜変化量

### 3. 2 地表面移動計（伸縮計）と傾斜計で測定した移動量と移動速度の比較

連結型傾斜計で測定した傾斜量を深さ毎の移動量に変換した後、全体を積算して求めた移動量・速度と、地表面移動計による計測結果とを比較検討した。

図2に d30(マサ 4m)実験のほぼ同じ位置で計測した地表面移動計 (SD-4) と連結型傾斜計 (IC-1、3~12) の移動量・速度の変化を示す。崩壊時の総移動量に約1cmの違いがあるが、移動量増加の傾向はほぼ同様である。また、移動速度も大きさに違いはあるが、変化パターンはほぼ同じである。なお、連結型傾斜計の最深部は土層底面が接している実験土槽（不動部分）に固定されていない。したがって、連結型傾斜計の変化量には、実験土槽表面と傾斜計最深部との隙間（1~2cm程度と思われる）にある土層部分の変形量が積算されていない。このため、連結型傾斜計の変化量が少なく計測されたものと考えられる。また、斜面底面付近（IC-2）の欠測も影響していると思われる。

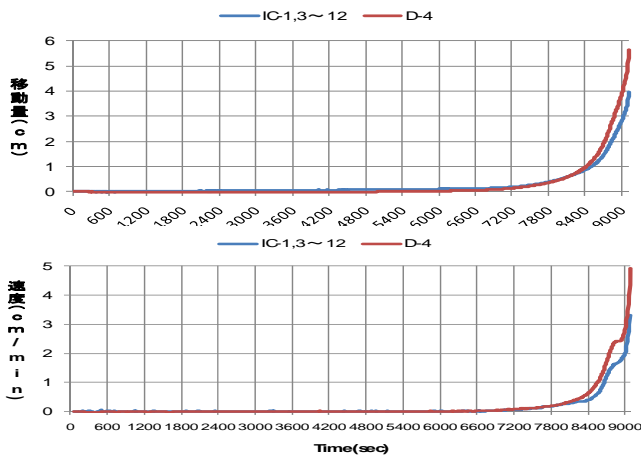


図2 移動量と速度の比較 (d30(マサ 4m))

次に、大型 30 度砂斜面 (b30(砂 2m)) における地表面移動計 (SD01) と傾斜計 (IC-1~12) の移動速度の変化を図3に示す。若干のノイズが見られるが、両者はほとんど同じ変化量と変化パターンを示している。この実験では斜面末端部に高さ 35cm の土留めを設け、その直前・直後の部分はほとんど変形しない構造となっている。連結型傾斜計の最深部は不動部分に設置されており、両者の移動量・速度がほぼ一致したものと考えられる。

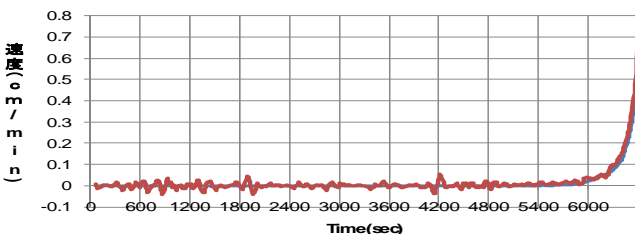


図3 速度の比較 (b30(砂 2m))

### 3. 3 逆数予測法への適用性について

図4に、b30(砂 2m)における移動速度の逆数曲線の比較を示す。両曲線はほぼ一致しており、傾斜計による計測結果への逆数予測法の適用可能性を示すものであ

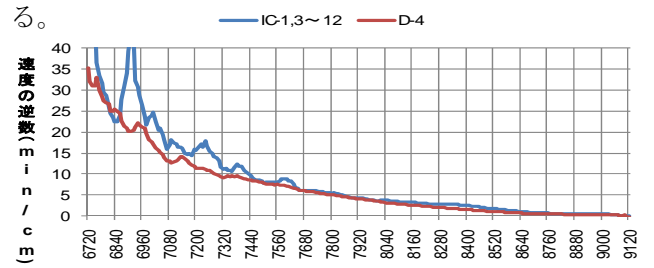


図4 速度の逆数曲線の比較 (b30(砂 2m))

る。図5に、連結型傾斜計の深さ毎の逆数変化を示す。当初、それぞれ異なる値を示すが、崩壊に近づくと同様な変動になり、全曲線が同じ崩壊時刻へ向かって減少する。このことは深さ毎の変化量を積算して求めた表面の移動量のみではなく、任意の深さにおける変化量からでも崩壊時刻の予測が可能であることを示している。すなわち、傾斜計をすべり面付近の深い場所まで埋設しなくても、比較的浅い箇所に設置しても有用な結果が得られる可能性を示唆するものである。

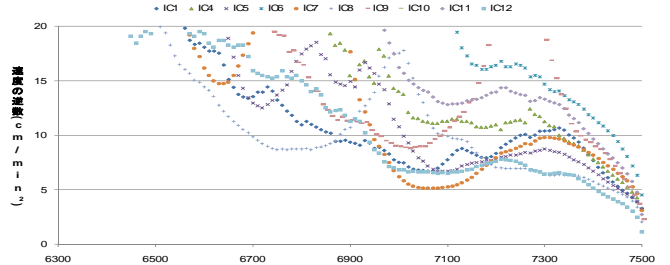


図5 深さ毎の逆数曲線 (b30(砂 2m))

### 4. 傾斜計による消防活動時の斜面監視

前章までに述べたように、傾斜計をすべり面付近まで深く埋設せずに地表面付近に設置しても、その計測結果を従来の斜面崩壊予測法へ適用出来る可能性のあることが分かった。また、本研究で使用した連結型傾斜計は計測用のケーブルを必要とするが、最新の無線通信技術を利用した計測システムと連携すれば、計測ケーブルは不要となる。しかも、本傾斜計は比較的安価であることから、例えば、斜面下部付近に、地表面から1m以内の多数点に設置して無線によりデータを転送する方法をとることで、設置をより安全に、かつ、遠方の安全な場所からの斜面挙動監視の可能性が示された。また、本稿では触れていないが、遠隔から面的に斜面変動を計測できるレーザースキャナなどと併用することにより、従来行われてきた目視による監視と比べ飛躍的に安全性が増すものと思われる。

### 5. おわりに

以上、理想化された斜面模型を用いた斜面崩壊実験による結果ではあるが、土砂災害における消防活動での二次崩壊監視センサーとして傾斜計が利用できる可能性のあることが明らかになった。しかし、実用化には解決すべき課題も多い。今後、センサーの改良（小型化・低廉化など）も含め、更なる検討を進める。

### 参考文献

- 1) 福園輝旗(2007)：斜面崩壊時の内部変形計測と崩壊時期予測、平成19年度砂防学会研究発表会概要集