

内部歪計による斜面崩壊発生予測法に関する研究 — 土砂災害消防活動時斜面監視への応用 —

植竹 政樹*・酒井 直樹**・福園 輝旗**

Study on Prediction of a Slope Failure by Multiple Inclinometers — The Applicability to the Activity of Fire Fighting —

Masaki UETAKE*, Naoki SAKAI**, and Teruki FUKUZONO**

**Tokyo Fire Department*

uetake@bosai.go.jp

*** Storm, Flood and Landslide Research Department,*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

sakai@bosai.go.jp, hukuzono@bosai.go.jp

Abstract

Monitoring instrumentation for warning information of slope failure is widely given by extensometer on the ground with cracks of scarp slope. But it included some weaknesses with the presence of cracks and the outer disturbance. In this study, we examine to establish the prediction method of slope failure by multiple inclinometer with Fukuzono decision method using several large-scale model tests. Based on this result, we found that this method enabled us easily and reasonably to predict the time of slope failure. Furthermore we discuss the applicability to the fire activity of landslide disaster with this method.

Key words : Model experiment, Slope failure, Prediction, Multiple inclinometer, Fire fighting

1. はじめに

自然災害は、戦後の復興期以来のハード対策により、1959年の伊勢湾台風災害を境として急激に減少してきている。しかしながら、平成21年7月に発生した山口県防府市の土石流災害や平成20年岩手・宮城内陸地震の熊倉崩壊にみられるように豪雨や地震を契機とした土砂災害は毎年数多く発生している。このため、近年、災害に対するハード対策の限界が指摘されるようになり、ソフト対策に視点が移ってきている。気象庁と都道府県が共同で全国規模の土砂災害警戒情報を発表するようになったのはその一例である。だが、その警戒の範囲は市町村単位であり、特に都市部ではその対象人数も多くなり無用な混乱を招く事態も考えられ、地域住民に対して「きめ細かな情報」を提供する必要性が高まってきている。防災科学技術研究所では公助・共助・自助の各活動を助けるた

めの「きめ細かな情報」として、どの地域が、どのくらい危険になったのかを示す客観的な情報を分かり易く知らせることが出来る土砂災害発生予測支援システムの開発を行っている。その取り組みの中で、斜面崩壊発生前に住民が安全に避難出来るように、斜面内部に埋設し崩壊につながる動き（前兆現象）を捉えることが出来る計測技術（機器）の開発を行っている。この技術は斜面災害による被災者などの捜索・救助活動（消防活動）時の二次災害防止にも応用可能ではないかと考え、本研究にて、その可能性を検討した。

消防活動時の二次災害を防止するためには、二次的な斜面崩壊（再崩壊）の発生を確実に監視・予測する必要がある。しかしながら、現時点では有効な観測手法（機器）・判断基準は確立されていない。二次災害に対する安全の確保は目視による監視にのみ頼っており、消防活動は再

* 東京消防庁

** 独立行政法人 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部

崩壊による二次災害の危険にさらされているのが現状である。そこで、本研究では、土砂災害の中でも前述のように今後も増加が懸念され、かつ、豪雨時に多発している斜面崩壊による災害に焦点を当て、その消防活動時における二次災害を防止するために有効と思われる計測機器と手法、ならびに判断基準について検討することとした。本来ならば、現地斜面で得られた観測データ等を用いて研究を進めるべきであるが、この種の崩壊現象は突発的に発生するため、実斜面での観測は困難である。このため、本研究では、防災科研が所有する大型降雨実験施設内の大規模模型斜面を使用した降雨時の斜面崩壊実験を行い、その発生過程把握に必要な種々物理量の計測データを得ることとした。これらの中で、再崩壊の事前察知に有効と思われる前兆現象として斜面の変形（表面移動、内部変形など）に着目し、それらを検知するのに有効と思われる内部歪計（連結傾斜計）とその計測手法、ならびに二次災害防止のための判断基準について検討した。

2. 土砂災害の二次災害と前兆現象

2.1 二次災害の事例

二次災害の事例として昭和 47 年 7 月 5 日に高知県土佐山田町繁藤¹⁾ で起こった土砂災害を例示する。この災害は局地的にわずか 5 時間で 386 mm の豪雨があり、同一地区で 5 回の斜面崩壊が発生した。2 回目の斜面崩壊（高さ 12 m、幅 12 m）により土砂除去作業中の消防団員 1 名が生き埋めとなり、救助作業中に 5 回目の大規模な斜面崩壊（高さ 80 m、幅 140 m、土砂量 10 万 m³）が発生し、消防団員を含む 60 名が犠牲になったものである。小規模な 4 回の斜面崩壊は大災害となった 5 回目の大規模な斜面崩壊が発生する前兆現象であったと思われる。そのほかにも、斜面からの湧水量の増減や落石等の前兆現象が確認されていたが、当時、斜面崩壊の発生要因に関わる知識がなかったため二次災害の被害を受けてしまったものである。消防職員として二次災害が発生した場合、大きな被害を受けることを肝に銘じておかなければならない事例である。同時に、前兆現象を正確に感知できる機器と斜面崩壊に関する正確な知識に基づく厳重な監視体制がとられていたならば、的確な判断がなされ、二次災害による大被害を回避できたかもしれないことが推察される。

2.2 土砂災害の前兆現象

本研究で対象としている土砂災害（斜面崩壊による災害）は、主としてがけ崩れによる災害である。この種の災害では、発生直前に斜面のはらみ出しなどの何らかの兆候（前兆現象）が見られることが多い。見過ごし等により前兆現象が確認できないこともあるが、災害発生の切迫性を判断し安全に避難するためには、前兆現象に関する情報の重要性は高い。表 1 は、がけ崩れ災害が発生した地域住民からのアンケートを集計し前兆現象を時間的目安として分類したものである²⁾。これらは、全て人の五感（主として目視）により確認される前兆現象であるが、元々は斜面が変形したことによって表面化した現象である。がけ崩れは小規模な崩壊が多いため、崩壊発生まで

表 1 崖崩れ発生前の前兆現象の種類とその発生時間
（土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会より転載）

Table 1 The type of premonitory phenomenon before landslide.

直前	1～2 時間前	2～3 時間前
湧水の停止 湧水の吹き出し 亀裂の発生 斜面のはらみ出し 小石がぼろぼろ落下 地鳴り	小石がぼろぼろ落下 新たな湧水の発生 湧水の濁り	湧水の増加 表面流の発生

の時間が短く、また変形量も微小である、この微小な斜面の変形を見逃さずにとらえることが斜面崩壊に至る前に避難する手段として重要である。このため、本稿で対象としている消防活動における切迫した状況での斜面監視においては、目視による観察に加え、斜面の微小変形を的確に捉えることが出来る計測システムとの併用が必要である。

3. 斜面崩壊発生予測のための観測技術

3.1 斜面観測技術について

土壌水分計・間隙水圧計など斜面内部の情報を得るものから、地表伸縮計のように斜面表面の変動を測るものなど、今までに様々な斜面観測機器が開発されてきているが、これらの機器は緩慢な動きの地すべり観測を主な対象としていることもあり、設置完了までに比較的時間がかかるものが多い。しかしながら、切迫性の高い斜面崩壊災害現場の消防活動では、迅速な対応が要求される。また、二次崩壊の危険性も高い。これらのことを考慮して、①危険な場所に極力立入る必要が無く、容易に設置できること、②崩壊の前兆現象を正確・確実に感知できること、③安価なこと、の 3 点を考慮にいれなければならない。斜面計測機器の検討は、本来ならば現地でモニタリングを行って斜面崩壊が発生した時の斜面の挙動を計測するのが理想であるが、その突発性のため、実行は困難である。前述のように、本研究では、崩壊の前兆現象として認識されている物理量である地表面移動量と地表・斜面内部の傾斜変化量を防災科研の保有する大型降雨実験施設で崩壊実験を行い、計測器の有効性を検討した。結論として、当然ながら万能な計測器は現在のところ存在しない。その中でも傾斜計は安価であり設置が容易である。斜面が崩壊する場合は、斜面の変形が見られるが、その変形は地下水位が上がった状態で起こることが多いため水位を測れば早期に崩壊を予知できる。しかし、自然斜面における地下水の状況は不確定要素が多く、正確に地下の状況を測ることはこれからの研究課題となっている。地表面移動計（伸縮計）と内部歪計の特長と本研究で利用した機器の仕様は以下の通りである。

(1) 地表面移動計（伸縮計）

地表面移動計は斜面表面に計測器本体（不動点）と杭（移動点）を設置し、インバー線をつなぎ斜面移動量を測るもの



図1 地表面移動計の形状
Fig. 1 Shape of extensometer.

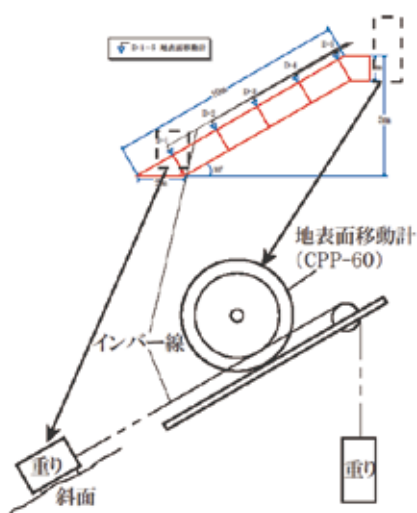


図2 地表面移動計の設置図
Fig. 2 Installation chart of extensometer.

である(図1, 2)。計測器は安価であり、特別な設置技術は必要としないため容易であり、このため今まで多くのデータが蓄積され、斜面崩壊予測法も地表面移動計により計測されたものを使用しているため利用しやすい。問題は設置にある。前記にあるように地表面移動計は不動点と移動点による移動量を計測しているため、斜面崩壊を引き起こす移動岩体が特定できない正確に計測出来ない。また、インバー線が保護管によって保護されず露出している場合、風雨やそれに伴う植生のインバー線の接触により、動揺を感知してしまう恐れがある。しかし、保護管を設置するためには危険な場所に長時間の立ち入り、作業しなければならず危険である。本研究では緑測器製回転角度センサ(CPP-60)を地表面移動計として使用し、後記の内部傾斜計との比較対象として計測を行った。

(2) 内部歪計(連結傾斜計)

傾斜計には、微小な火山活動や地殻変動を捉えるための超高精度(すなわち超高価)なものを筆頭に、種々開発さ

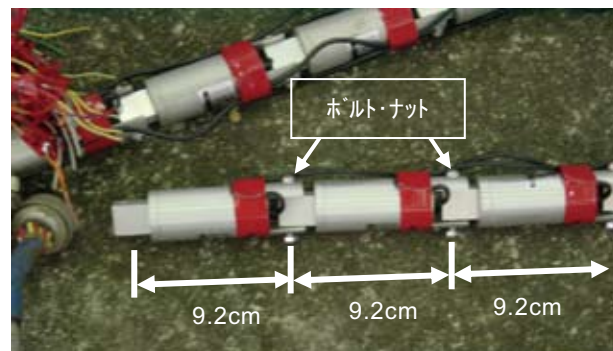


図3 内部歪計の形状
Fig. 3 Shape of multiple inclinometers.

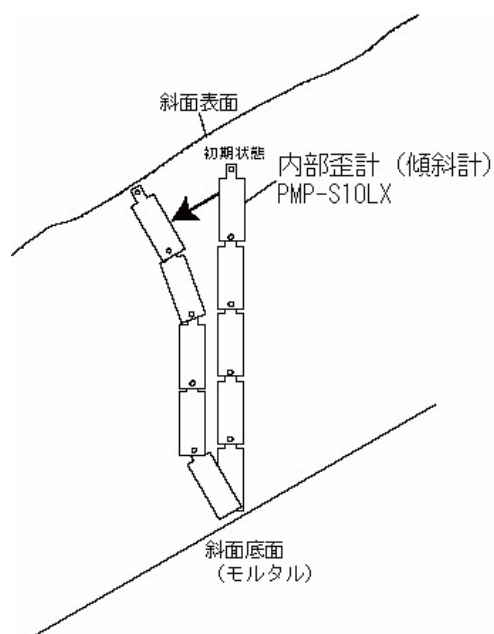


図4 内部歪計の設置図
Fig. 4 Installation chart of multiple inclinometers.

れているが、前述の条件③(安価なこと)にあうものとして、本研究では、センサー内部には緑測器製の傾斜計を内蔵し、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・ナットで連結して鉛直方向に埋設した(図3, 4)。このセンサーは、深さ約10cm毎変化量から斜面土層の剪断歪の測定が可能でありクリープ変形理論に適合しやすい。有効傾斜角 $\pm 10^\circ$ で、分解能は 0.01° 以下の微小な角度の変化で斜面の変形をとらえることが出来る。設置場所の選定は難しく、斜面に埋め込む設置作業があり危険な現場に立ち入る必要があるという問題はあるが、無線によるコードレスな傾斜計も研究³⁾されており、埋設することで地表面移動計より外乱の影響を受けにくくノイズの少ない安定した計測が可能であり、不動点を必要としないため設置自体は容易である。しかしながらデータの解釈が難しく研究もあまりされてきていないこともあり課題も多い。

3.2 斜面崩壊予測法と傾斜計

通常時における斜面崩壊発生時期の予測は既に実用化の段階にあり、必要な観測手法もほぼ確立されている。種々提案されている斜面崩壊発生時期予測法の中で、広く利用されているのは斎藤方式⁴⁾と福園方式(逆数予測法)⁵⁾である。この両方式の基本的考え方(斜面移動速度と崩壊発生までの残り時間が反比例の関係)は同じではあるが、斜面崩壊時期予測法は全て地表面移動計(伸縮計)で計測した移動量(移動速度)の使用を前提として開発されており、適用性の検討に使用する福園方式(以降、逆数予測法と呼ぶ)も例外ではない。内部歪計は角度変化を計測しているため、そのまま斎藤式や福園式に適用することは困難である。また、傾斜計は斜面の1部分の傾斜変化量(凹みやはらみだし)を計測しているのに対し、地表面移動計は1部分の斜面の凹みやはらみだしを含めた斜面移動量を計測しており、本質的に違う現象を計測していると考えられる。しかしながら、傾斜計による斜面崩壊予測研究⁶⁾が行われた例は非常に少なく、新たに傾斜計による斜面崩壊予測法を確立するには斜面崩壊実験と現地斜面崩壊での観測を繰り返す必要があり非効率的である。そこで、本研究では、一般的に使用されている地表面移動量による崩壊発生予測法に傾斜計センサーの傾斜変化量をうまく適用させる方法を考慮する方が得策であると考え、傾斜変化量(角度)を移動量ならびに移動速度に変換して適用した。

4. 斜面崩壊実験

斜面形状と供試土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と崩壊時間等を表2に示す。実験では、崩壊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(地表面移動計:伸縮計)と斜面内部の傾斜変化(内部歪計)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。

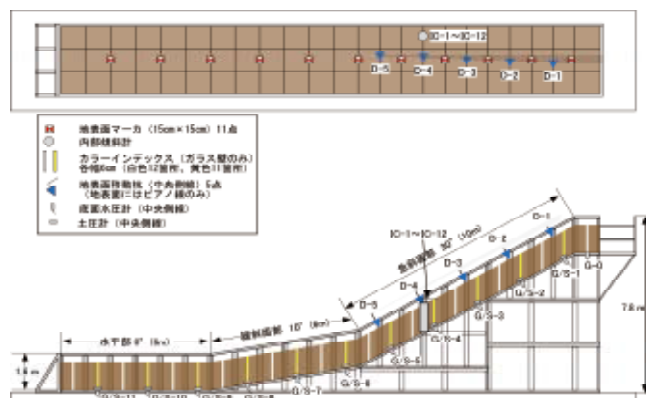


図5 長大30度マサ斜面模型計測器設置位置図
Fig. 5 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.

4.1 実験1ー長大30度マサ斜面による崩壊実験

4.1.1 実験の概要

斜面模型の形状を図5に示す。全体の高さ7.8m・幅4m・土層1mで、崩壊を発生させるための急斜面部(長さ10m、傾斜角30度)の下流に、緩斜面部(長さ6m、傾斜角10度)と水平部(長さ6m)を有する構造となっている。斜面土層の底面は鉄板製の不透水面で、表面に凸凹が付いている。また、左側面と上端、末端は1.2m高の鉄枠、最下端での排水はしていない。

地表面移動計(D-1~5)と内部歪計(IC-1~12)は図5に示す位置に設置した。地表面移動計により斜面表面の変化量を計測し、内部歪計は斜面内部の変位量を計測した。なお、試料には筑波山マサ土を使用した。

降雨入力は50mm/hの一定強度で連続して散水し、総雨量約125mmの約2時間32分(9,120秒)後に斜面が崩壊した(図6)。

4.1.2 地表面移動計による計測

図7は地表面移動計による計測結果で、Y軸が移動量(cm)、X軸が時間(秒)である。なお、事前降雨によって微小な変形を示したが、実験開始時を基準値(移動量0)と

表2 実験条件と結果一覧

Table 2 List of experimental conditions and result.

実験 No.	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	降雨条件と崩壊発生			備考
		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	長大30度マサ斜面	7.8	4	1	30	マサ土	有	50	2:32:00	なし	
実験2	大型30度砂斜面	5	4	1	30	砂	無	50	1:50:00	なし	上部給水
実験3	大型30度マサ斜面	5	4	1	30	マサ土	無	50	1:21:00	90	
実験4	大型40度マサ斜面	5	4	1	40	マサ土	無	30→50	4:24:00	105	30*210分 50*54分
実験5	中型30度マサ斜面1	3	1.5	0.5	30	マサ土	有	50	1:27:00	なし	
実験6	中型30度マサ斜面2	3	1.5	0.5	30	マサ土	有	50	1:32:00	60	
実験7	中型40度マサ斜面	4	1.5	0.5	40	マサ土	有	50	1:37:00	なし	



図6 長大30度マサ斜面の状況
Fig. 6 Behavior of slope failure of Masa slope.

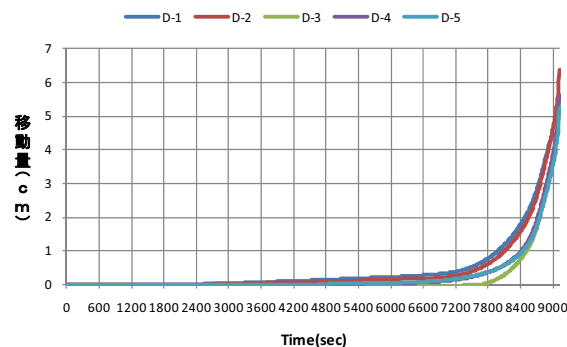


図7 地表面移動計で計測した移動量変化(長大30度マサ斜面)

Fig. 7 Travel distance with time by extensometer (extra large-scale Masa slope of 30 degrees).

して、それからの変化量を示している。なお、以降、移動量変化、角度変化、変位量変化のグラフにおけるY軸、X軸、基準値は上記と同様に設定してある。

図7より約2,400s(崩壊の約1時間52分前)までは変化が見られないが、約2,400s後に斜面上部(D-1, 2)での変化、約6,900s後に下部(D-4, 5)での変化、約7,800s後(崩壊の約22分前)から斜面中腹(D-3)での変化が計測され、すべての測点で変化が見られた。最大移動量はD-2の約6cmで、他はほぼ同じの約5cmであった

4.1.3 内部歪計による計測

図8は内部歪計(IC-1~12)の計測結果でY軸に角度変化量(度)、X軸に時間を示している。正の方向が斜面下方向を示している。なお事前降雨によって動いているが、基準値を実験開始時合わせ、移動量をゼロとした。なおIC-2は機械的不良で図には示していない。また、以降、移動量変化のグラフにおけるY軸、X軸、基準値は上記と同様に設定してある。内部歪計は地表面移動計D-4の5cm上部、右側面から50cmの位置に鉛直に埋設してあり、最上端IC-12は地表面から約5cm突き出して設置している。6,900sまでは角度の変化は見られないが、6,900s以降は最下部IC-1に変化があり、IC-4以外は正の方向に変化した。角度の変化が最大だったものはIC-3で約12度、最小であったものはIC-7で約0.04度であった。

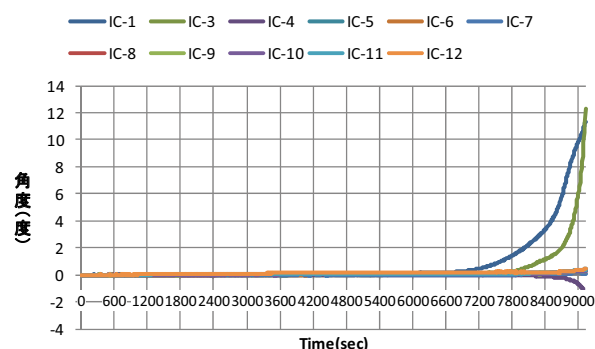


図8 内部歪計で計測した角度変化(長大30度マサ斜面)
Fig. 8 Angle variation with time by multiple inclinometers (extra large-scale Masa slope of 30 degrees).

4.2 実験 2 - 大型 30 度砂斜面による崩壊実験

4.2.1 実験模型の概要

模型斜面は高さ 5 m・幅 4 m・土層厚 1 m・斜面角度 30 度である (図 9)。土層底面は不透透の平面であり、表面に凸凹のついたモルタル処理を施している。両側と上端には 1.1 m の鉄枠、最下端には斜面表面から浸透水の湧水を防ぐために砂利による水抜き処理が施されている。土層内の末端部付近には高さ 35 cm の土留めが設けてあり、土留めの上端部を通る最終すべり面が形成されやすい構造になっている。

計測には、インバー線を用いた地表面移動計 (D-1 ~ 5)、内部歪計 (IC-1 ~ 12) を図 9 に示す位置に設置した。なお、試料には桜川砂を使用した。

50 mm/h 一定強度の降雨を約 1 時間 50 分 (6,650 s) 与え、総雨量約 125 mm で崩壊した (図 10)。

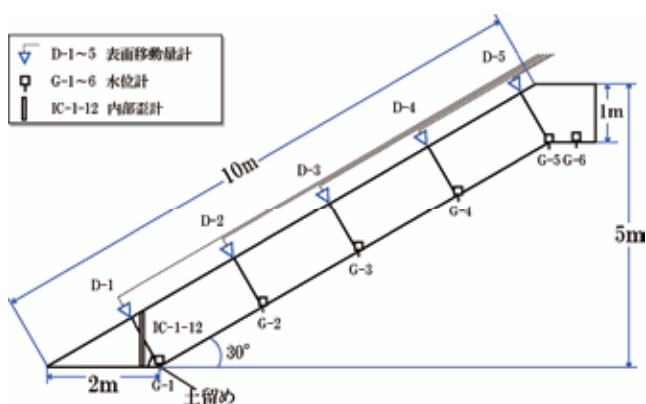


図 9 大型 30 度砂斜面模型 計測器設置位置

Fig. 9 Outline of model slope with sand and instrumentation location on each sensors.

4.2.2 地面移動計による計測

地表面移動計は D-1 が斜面下部で D-5 が斜面上部である。図 11 は地表面移動計により計測した移動量変化を示している。図 11 より約 5,400 s (崩壊の約 1 時間 30 分) まではグラフに変化が見られない。5,400 s 以降は D-1 以外で変化が計測され、約 6,000 s (崩壊まで約 10 分) までにはすべてに変化が見られた。Y 軸の最大移動量は D-4 の約 3 cm で、最小は D-1 の約 0.5 cm であった。

4.2.3 内部歪計による計測

内部歪計は斜面下部の地表面移動計 D-1 と同位置で右側面から 100 cm に設置している。図 12 は内部歪計の計測結果で Y 軸に角度変化量 (度) X 軸に時間を示している。正の方向が斜面下方向を示している。なお事前降雨によって動いているが、基準値を実験開始時合わせ、移動量をゼロとした。5,400 s までは角度の変化は見られないが、5,400 s 以降は IC-1, 2 以外の計測器は正の方向に変化が見られた。角度の変化が最大だったものは IC-12 で約 0.9 度、最小であったものは IC-1, IC-2 でほぼゼロであった。

4.3 実験 3 - 大型 30 度マサ斜面

4.3.1 実験の概要

模型斜面の形状は実験 2 (第 4.2 節) と同じである (図 9, 図 13)。表面移動計の設置位置も同じであるが、内部歪図計

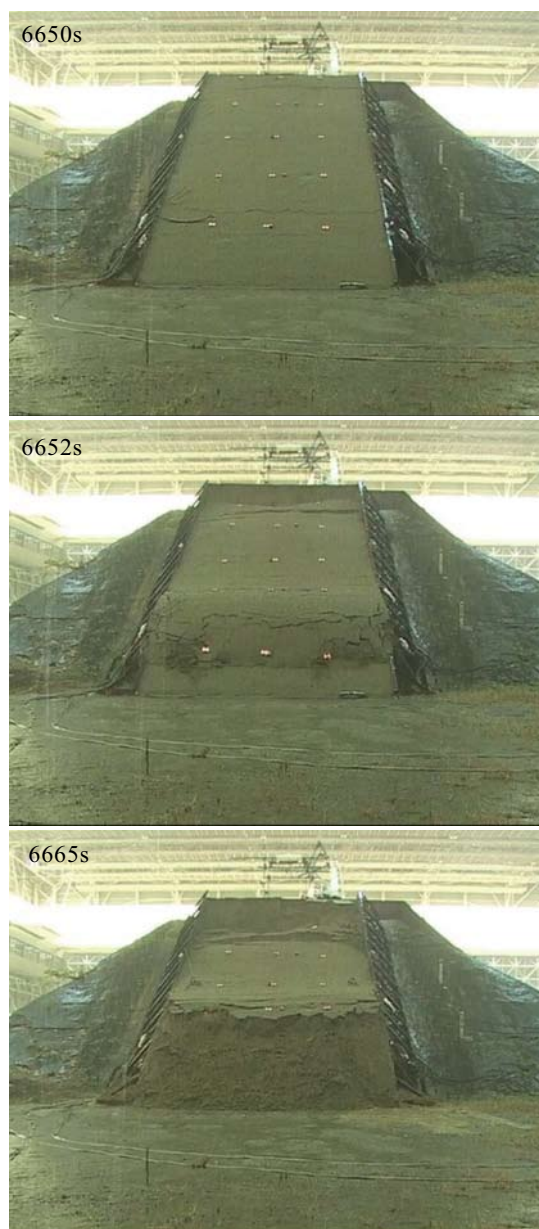


図 10 大型 30 度砂斜面崩壊時の状況

Fig. 10 Behavior of slope failure of sand slope.

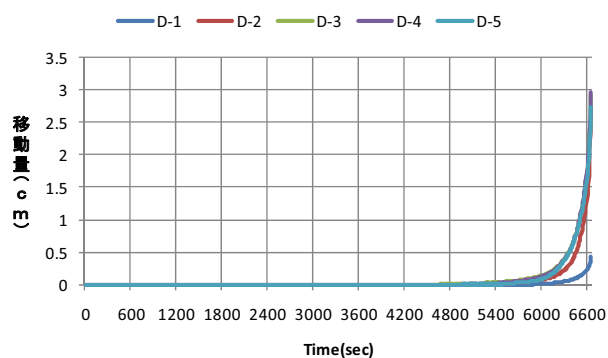


図 11 地表面移動計で計測した移動量変化 (大型 30 度砂斜面)

Fig. 11 Travel distance with time by extensometer (large-scale sand slope of 30 degrees).

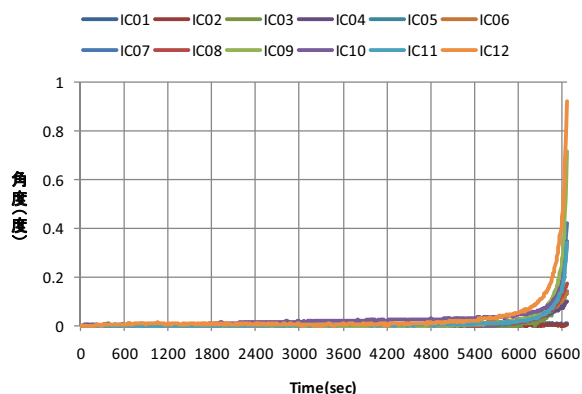


図 12 内部歪計で計測した角度変化 (大型 30 度砂斜面)

Fig. 12 Angle variation with time by multiple inclinometers (large-scale sand slope of 30 degree).

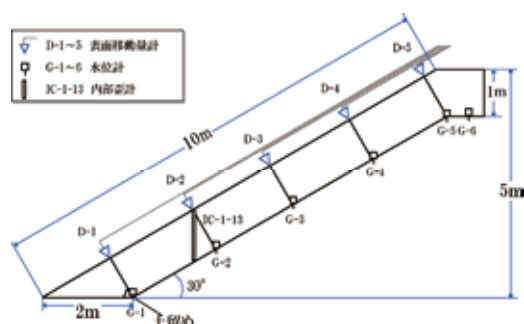


図 13 大型 30 度マサ斜面模型 計測器設置位置

Fig. 13 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.

の設置位置は斜面中腹の表面移動計 SD-2 と同じ位置に設置した。試料は筑波産マサ土を使用した。

斜面作成後、事前降雨として前日に 30 mm/h の降雨を連続して 3 時間を与え、実験日は 50 mm/h の降雨を連続して与え約 2 時間 5 分後 (7,500 s) に崩壊した。本実験の雨量は約 68 mm、事前降雨を合わせた総雨量は約 158 mm であった (図 14)。

4.3.2 地面移動計による計測

地表面移動計は D-1 が斜面下部で D-5 が斜面上部である。図 15 に地表面移動計による計測結果を示す。約 4,500 s (崩壊まで約 1 時間 10 分前) まではグラフに変化が見られない。4,500 s 以降は D-4, 5 の斜面の上部から下部へ順に変化が計測され、約 6,000 s (崩壊まで約 25 分前) までにはすべてに変化が見られた。Y 軸の最大移動量は D-4 の約 15 cm で、最小は D-1 の約 1 cm であった。

4.3.3 内部歪計による計測

内部歪計は斜面中腹の地表面移動計 D-2 と同位置で右側面から 100 cm に設置した。図 16 に内部歪計の計測結果を示す、なお IC-2, 3, 13 は欠測である。4,800 s までは角度の変化は見られないが、4,800 s 以降はすべての計測器で変化が見られ、角度変化量の最大は IC-12 で約 3.2 度、最小は IC-10 の約 -0.2 度であった。



図 14 大型 30 度マサ斜面崩壊時の状況

Fig. 14 Behavior of slope failure of Masa slope.

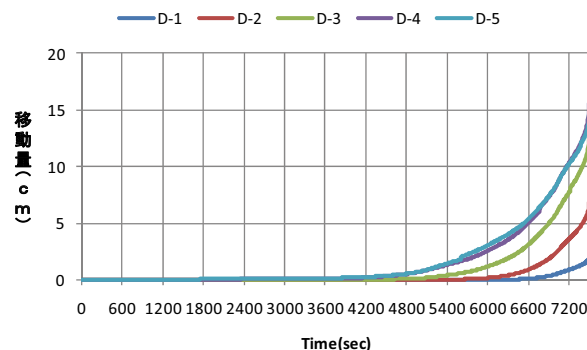


図 15 地表面移動計で計測した移動量変化 (大型 30 度マサ斜面)

Fig. 15 Travel distance with time by extensometer (large-scale Masa slope of 30 degrees).

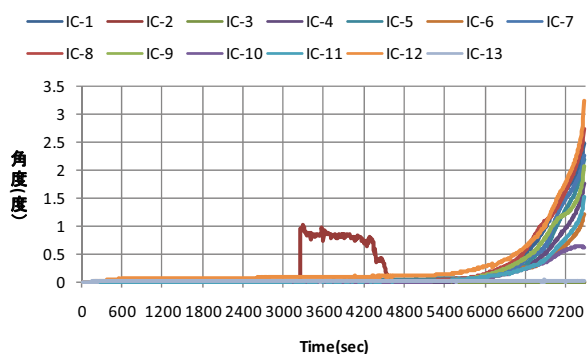


図 16 内部歪計で計測した角度変化 (大型 30 度マサ斜面)
 Fig. 16 Angle variation with time by multiple inclinometers (large-scale Masa slope of 30 degrees).

4.4 実験 4 - 大型 40 度マサ斜面

4.4.1 実験の概要

模型形状は図 17 に示す通りで、高さ 5 m・幅 4 m・土層厚 1 m・斜面角度 40 度である。土層底面はモルタル処理した不浸透の平面で、その表面にはすべり止めの凸凹を施した。両側と上端は、1.1 m 高の鉄枠、最下端は自然斜面を近似させ、湧水による崩壊を防ぐ理由から砂利による水抜き処理を行っている。

インバー線を用いた地表面変位計 (D-1 ~ 5)、内部歪計 (IC-1 ~ 13) を図 17 に示す位置のように設置した。なお、試料には筑波産マサ土を使用した。

本実験の前に事前降雨として、6 日前に 15 mm/h を 4 時間、3 日前に 15 mm/h を 3 時間、2 日間の雨量合計で 105 mm を降らせて、初期状態を設定した。本実験では、30 mm/h の降雨を 3 時間 30 分、50 mm/h を 54 分与え、降雨開始から 4 時間 24 分 (15,720 s) 後に総雨量 90 mm で崩壊した (図 18)。

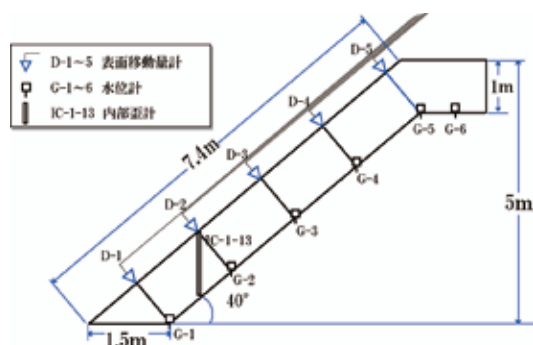


図 17 大型 40 度マサ斜面模型 計測器設置位置
 Fig. 17 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.

4.4.2 地表面移動計による計測

地表面移動計は斜面上部に D-1、斜面上部に D-5 と設置している。図 19 に地表面移動計で計測した結果を示す。図 19 より 10,200 s までは変化がみられない。10,200 s 以降はすべてに変化がみられた。変化量が最大だった D-5 は約 21 cm で、最小の変化量であったのは D-1 で約 8 cm であった。移動変化量は斜面上部が比較的大きい。



図 18 大型 40 度マサ斜面崩壊時の状況
 Fig. 18 Behavior of slope failure of sand slope of 40 degree.

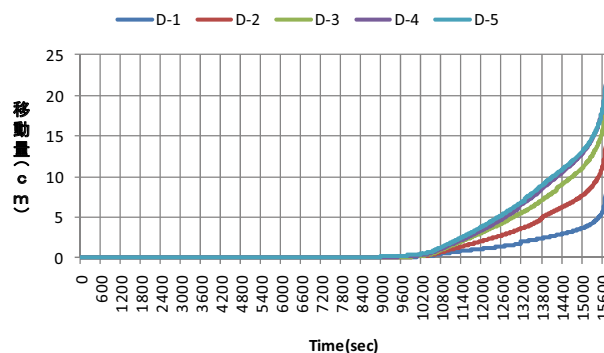


図 19 地表面移動計で計測した移動量変化 (大型 40 度マサ斜面)
 Fig. 19 Travel distance with time by extensometer (large-scale Masa slope of 40 degrees).

4.4.3 内部歪計による計測

内部歪計は斜面中腹の地表面移動計 D-2 と同位置であり、右側面から 200 cm のほぼ中央に設置した。図 20 に内部歪計による計測結果を示す。なお IC-1, 13 は故障のため欠測である。10,000 s までは角度の変化は見られないが、10,000 s 以降は IC-3, 5, 6 で負の方向へ変化し、その他は正の方向へ角度が変化した。変化が最大だったものは IC-2 で -14 度、最小であったものは IC-6 でほぼ 0 度であった。斜面中間層では比較的变化が小さかった。

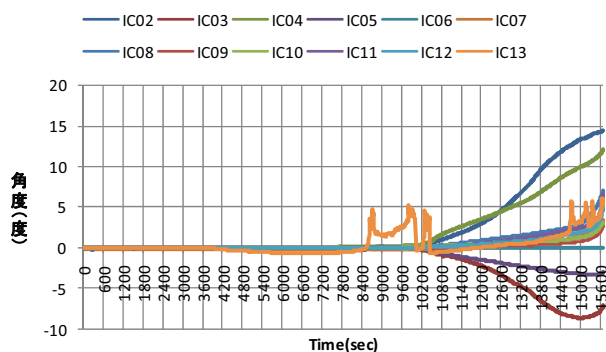


図 20 内部歪計で計測した角度変化（大型 40 度マサ斜面）
 Fig. 20 Angle variation with time by multiple inclinometers (large-scale Masa slope of 40 degrees).

4.5 実験 5－中型 30 度マサ斜面 1

4.5.1 実験の概要

斜面模型の形は高さ 3.5 m・幅 1.5 m・土層 0.5 m 斜面角度 30 度で水平部が 2 m の斜面模型を作成した(図 21)。模型斜面用の土層底面は不浸透の平面であり、表面に凸凹のついた鉄板を施しており、右側面・上端面も同様に鉄板である。左側面は強化ガラスで斜面内部の状況を観察することができる。末端部分は木製板で土層を抑え、木製板と鉄板の間はシリコンゴムで補強し排水は行っていない。

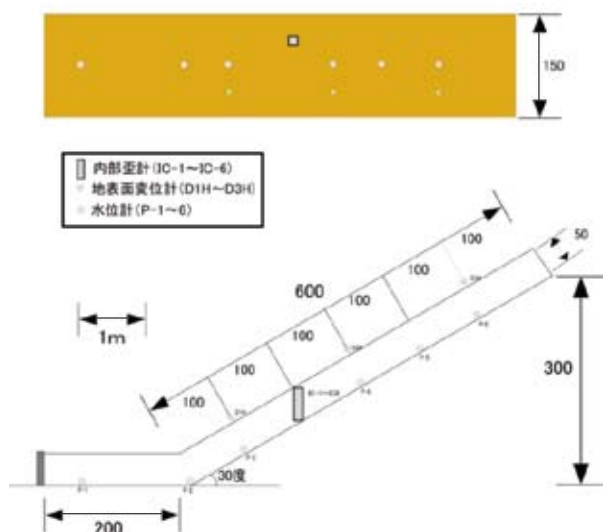


図 21 中型 30 度マサ斜面 1 計測器設置位置
 Fig. 21 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.

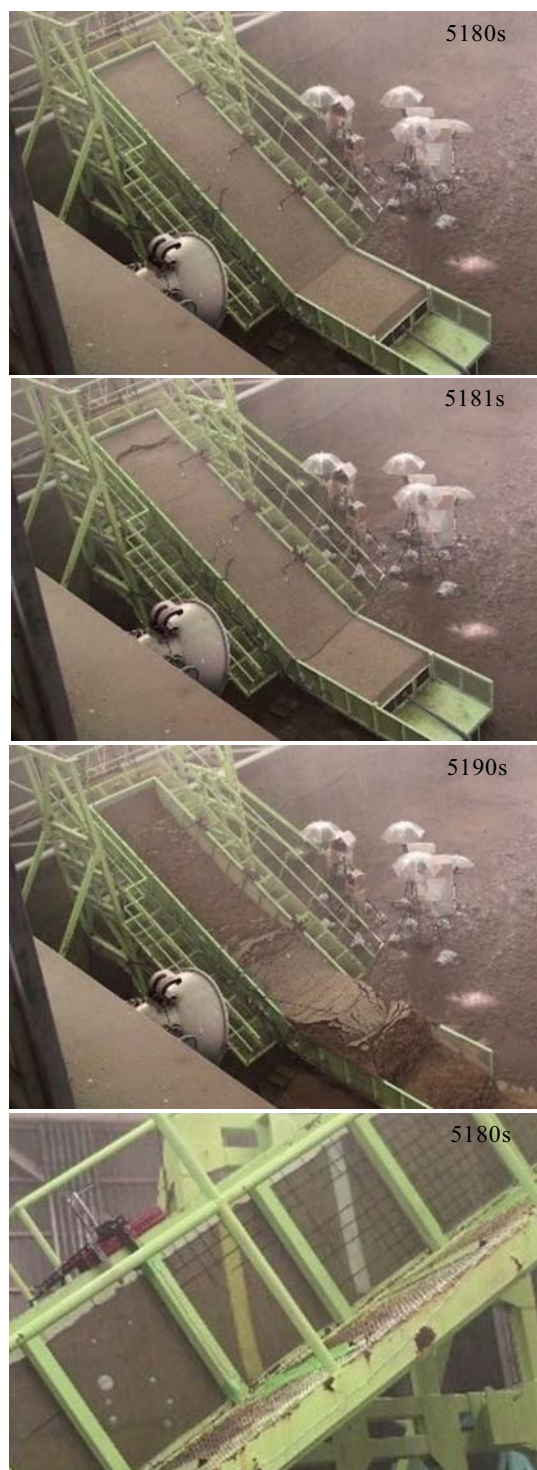


図 22 中型 30 度マサ斜面 1 崩壊時の状況
 Fig. 22 Behavior of slope failure of medium-scale Masa slope of 30 degree.

計測には、地表面移動計を設置せずと内部歪計 (IC-1 ~ 6) のみを図 21 に示す位置に設置した。なお、試料には筑波産マサ土を使用した。

事前降雨なしで、50 mm/h の降雨を連続して与え、約 1 時間 27 分 (5,180 s) 後に総雨量約 75 mm で崩壊した(図 22)。

4.5.2 内部歪計による計測

内部歪計は斜面中腹の右側面から 75 cm に設置した。図 23 に内部歪計による計測結果を示す。3,400 s までは角度の変化は見られないが、3,400 s 以降は IC-1, 2, 5, 6 で正の方向へ変化し、その他は負の方向へ角度が変化した。変化が最大だったものは IC-1 で約 4 度、最小であったものは IC-3 でほぼ約 0.3 度であった。斜面中間層では比較的变化が小さく、表面と底面で変化が大きい。

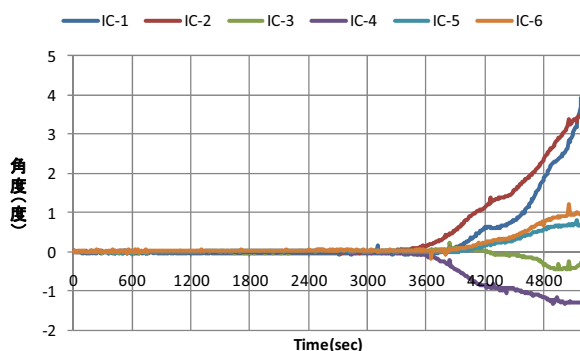


図 23 内部歪計で計測した角度変化 (中型 30 度マサ斜面 1)
 Fig. 23 Angle variation with time by multiple inclinometers (Medium-scale Masa slope of 30 degrees).

4.6 実験 6 - 中型 30 度マサ斜面 2

4.6.1 実験の概要

模型斜面の形状は前述の中型 30 度マサ斜面 1 (第 4.6 節) とほぼ同様である (図 24)。同様に末端部分は木製板で土壌を抑え、木製板と鉄板の間はシリコンゴムで補強し、排水は行っていない。

前日に事前降雨として 15 mm/h を 4 時間与えた後、本実験では 50 mm/h の降雨を連続して与え、1 時間 32 分 (5,556 s) 後に、本実験の総雨量約 75 mm で崩壊した (図 25)。

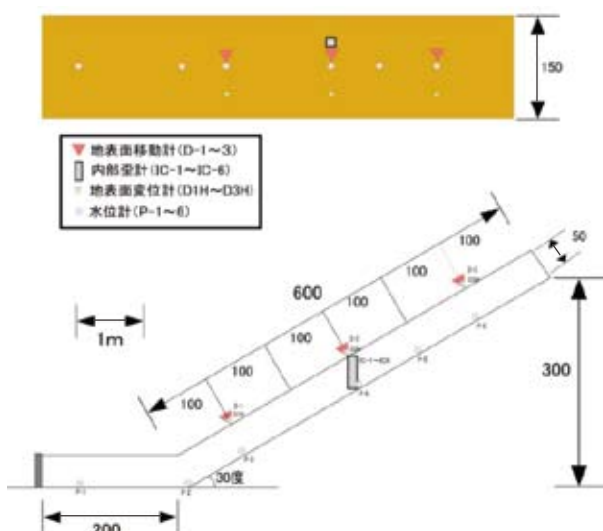


図 24 中型 30 度マサ斜面 計測器設置位置
 Fig. 24 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.



図 25 中型 30 度マサ斜面 崩壊時の状況
 Fig. 25 Behavior of slope failure of medium-scale slope of 30 degrees.

4.6.2 地表面移動計による計測

図 26 に地表面移動計によって計測した結果を示す。Y 軸に変化量 (cm), X 軸に時間 (秒) を示している。地表面移動計の設置位置は、D-1 が斜面下部、D-2 が斜面中腹、D-3 が斜面上部である。

斜面上部 D-3 は実験開始直後から徐々に移動量が増加

し、600 sからは斜面下部 D-1 が増加した。3,600 s以降はすべてに変化がみられた。斜面変化量が最大だった D-1 は約 0.7 cm で、最小の変化量であったのは D-3 で約 0.5 cm であった。移動量の変化が斜面上部→斜面下部→斜面中腹と変化し、最終的な急上昇は斜面下部から斜面上部へと変化した。

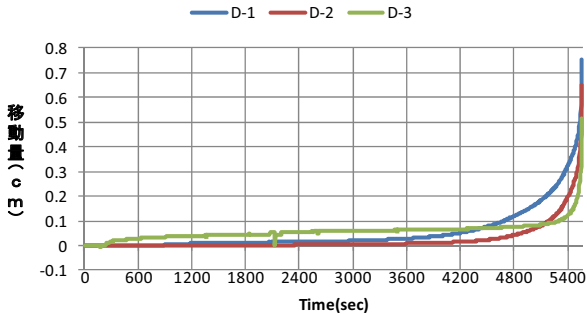


図 26 地表面移動計で計測した移動量変化 (中型 30 度マサ斜面)

Fig. 26 Travel distance with time by extensor (medium-scale Masa slope of 30 degrees).

4.6.3 内部歪計による計測

内部歪計は斜面中腹の地表面移動計 D-1 と D-2 の中間で、右側面から 75 cm のほぼ斜面中央に設置した。図 27 に内部歪計による計測結果を示す。斜面の中間に位置する IC-3・IC-4 が実験開始以降正の方向へ変化し、4,200 s 以降にすべてのセンサーで角度が上昇し変化している。変化が最大だったものは IC-2 で 0.4 度、最小であったものは IC-5 でほぼ 0 度であった。最下部のセンサーが比較的大きく変化し、中間層の変化が少ない。

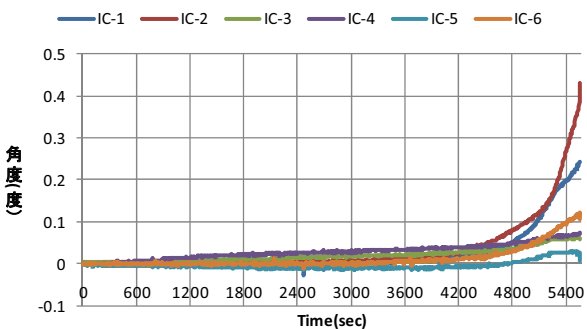


図 27 内部歪計で計測した角度変化 (中型 30 度マサ斜面 2)

Fig. 27 Angle variation with time by multiple inclinometers (medium-scale Masa slope of 30 degrees).

4.7 実験 7－中型 40 度マサ斜面

4.7.1 実験の概要

斜面模型の形は高さ 4.5 m・幅 1.5 m・土層 0.5 m 斜面角度 40 度で水平部が 2 m の斜面模型を作成した (図 28)。模型斜面用の土層底面は不浸透の平面であり、表面に凸凹のついた鉄板を施しており、右側面・上端面も同様に鉄

板である。左側面は強化ガラスで斜面内部の状況を観察することができる。末端部分は木製板で土壌を抑え、木製板と鉄板の間はシリコンゴムで補強し排水は行っていない。

本実験では 50 mm/h の降雨を 1 時間 37 分 (5,724 s) 間与え、総雨量約 81 mm で崩壊した (図 29)。

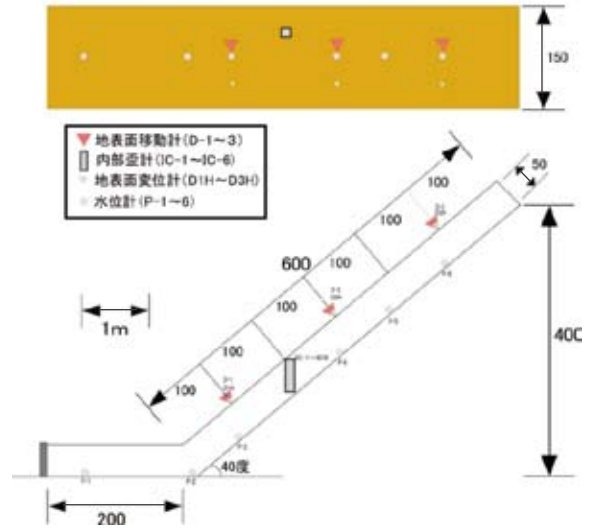


図 28 中型 40 度マサ斜面 計測器設置位置

Fig. 28 Outline of model slope and instrumentation location on each sensors.

4.7.2 地表面移動計による計測

図 30 に地表面移動計によって計測した結果を示す。移動計の設置位置は、D-1 が斜面下部、D-2 が斜面中腹、D-3 が斜面上部である。

実験開始から、4,000 s まで変化が見られないが、4,000 s からはすべての測点で増加を示した。変化量の最大は D-3 で約 12 cm、最小の変化量は D-1 で約 7.5 cm であった。移動量の変化は斜面上部が大きく斜面下部が小さい状況であった。

4.7.3 内部歪計による計測

内部歪計は斜面中腹付近の地表面移動計 D-1 と D-2 の中間で、右側面から 75 cm のほぼ中央に設置した。図 31 に内部歪計による計測結果を示す。3,900 s 以降にすべてのセンサーで角度が上昇している。変化量の最大は IC-6 で約 13 度、最小は IC-4 で約 1 度であった。最上部と下部のセンサーが比較的大きく変化し、中間層の変化が少ない。

5. 考察

5.1 内部歪計の設置位置と角度の変化

内部歪計は傾斜計 (9.2 cm 長) を鉛直深さ方向に連結したものであり、深さごとの土層の動きを示していると言える。図 32 は第 4 章の実験を元に、長大斜面 (d30) と大型斜面 (b30・b40) で内部歪計が崩壊直前に計測した角度を示し比較したものである。縦軸は斜面鉛直方向の深さを示し、0 が斜面表面である。横軸の正の値が斜面下部方

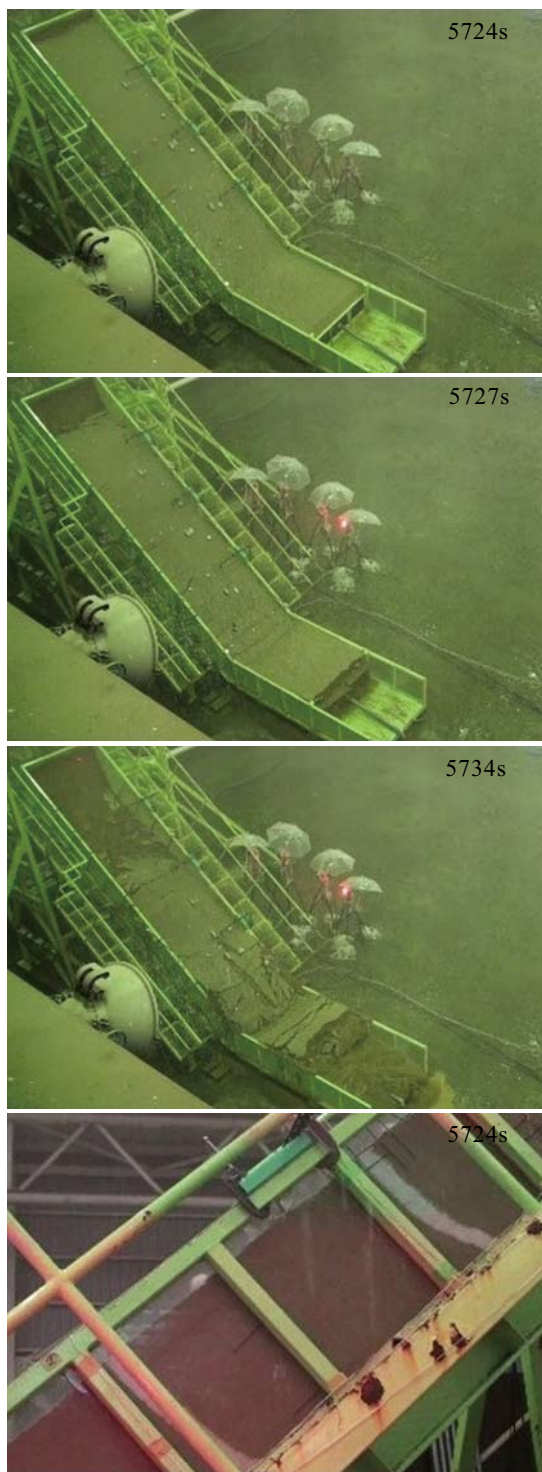


図 29 中型 40 度マサ斜面 崩壊時の状況
 Fig. 29 Behavior of slope failure of Masa slope of 40°.

向を示している。b30 (砂・2 m) 以外は斜面底面に近い部分で比較的角度の変形量が大きいがわかる。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 (マサ土・2 m) と d30 (マサ土・2 m) 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・2 m) は斜面底面の角度変化量が少ないが、これは模型装置に設置している土留めによりすべり面が形成されなかったことによると考えられる。

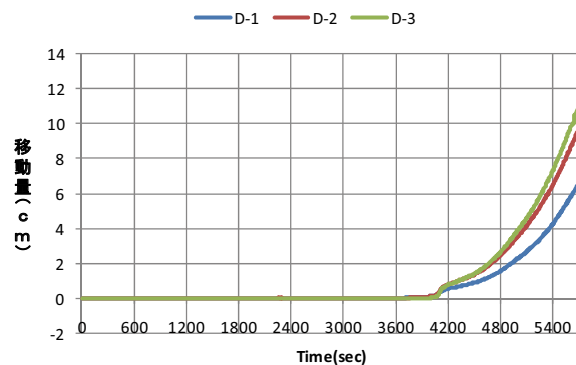


図 30 地表面移動計で計測した移動量変化 (中型 40 度マサ斜面)
 Fig. 30 Travel distance with time by extensometer (medium-scale Masa slope of 40 degrees).

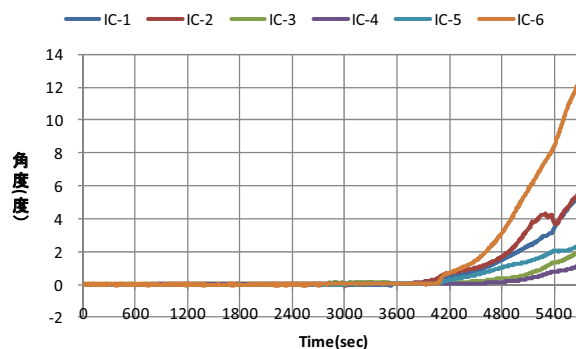


図 31 内部歪計で計測した角度変化 (中型 40 度マサ斜面)
 Fig. 31 Angle variation with time by multiple inclinometer (medium-scale Masa slope of 40 degrees).

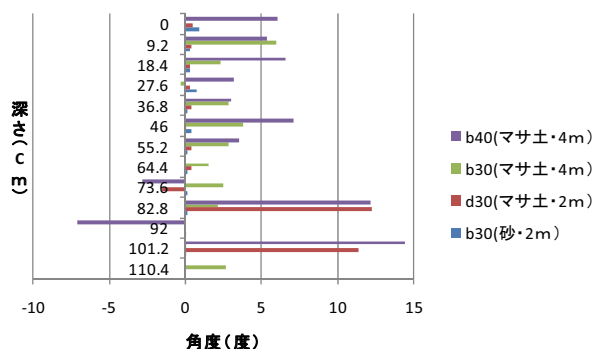


図 32 長大斜面・大型斜面実験で崩壊直前に計測された角度 (※ b: 大型斜面 d: 長大斜面 30:30 度 40:40 度 2 m・4 m: のり尻からの設置距離)
 Fig. 32 Angle measured by extralarge-scale and large-scale slope experiments immediately before collapse (* b: Large-scale slope, d: extralarge-scale slope. 30: 30 degree gradient, 40: 40 degree gradient. 2 m or 4 m: Installation distance from slope toe).

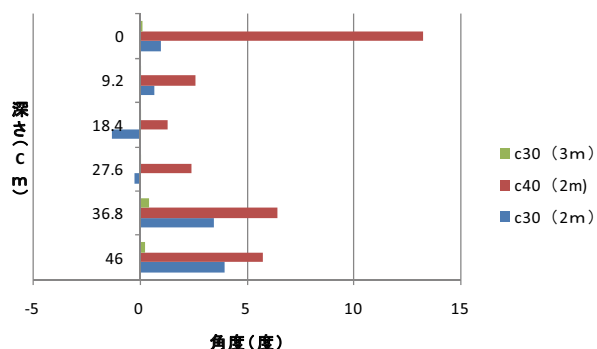


図 33 中型斜面実験で崩壊直前に計測された角度変化
Fig. 33 Angle variation measured by medium-scale slope experiments immediately before collapse.

図 33 は中規模斜面 (c30・c40) の内部歪計が崩壊直前に計測した角度である。図 32 と同様に斜面底面で角度変化量が大きくなっているが見て取れるが、c40 や図 32 の b40 のように傾斜角が大きい斜面では表面付近の土砂が動き、角度の変化量が大きく、土層の中間層では角度の変化量は比較的小さい。これは図 22, 25, 29 最下の斜面側面の状況と類似する。

以上のことから、傾斜計で内部歪を計測するにあたっては、傾斜が緩い場合には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ことに留意すべきであることが分かる。

5.2 崩壊時期予測法への適用可能性について

前述したように、逆数予測法を含めた既存の斜面崩壊時期予測法は全て地表面移動計 (伸縮計) で計測した移動量 (移動速度) の使用を前提として開発されている。内部歪計は角度変化を計測しているため、そのまま逆数予測法に適用することは困難である。また、傾斜計は斜面の 1 部分の傾斜変化量 (凹みやはらみだし) を計測しているのに対し、地表面移動計は 1 部分の斜面の凹みやはらみだしを含めた斜面移動量を計測しており、本質的に違う現象を計測していると考えられる。現在のところ傾斜計による斜面崩壊予測研究は少なく、特に本研究で対象としているがけ崩れ・表層崩壊に対する研究は皆無である。このため、新たに傾斜計による斜面崩壊予測法を確立するには斜面崩壊実験と現地斜面崩壊での計測を繰り返す必要があるが非効率的である。そこで、本研究では、一般的に使用されている地表面移動量による崩壊発生予測法に傾斜計で計測した傾斜変化量をうまく適用させ考慮する方が得策であると考え、傾斜変化量 (角度) を移動量ならびに移動速度に変換して適用して、その有効性を検討した。

5.2.1 角度から移動量への変換方法

傾斜計から移動量への変換式は以下の式を使用し検討を行った。

$$\text{斜面長方向の移動量 } x = H \times \sin \theta / \cos \alpha \quad (1)$$

(H: 傾斜計の長さ, θ : 傾斜計が傾いた角度, α : 斜面の傾斜角)

ただし、斜面深さ方向の沈下は無いことが前提である。

5.2.2 地表面移動計と内部歪計で測定した移動量と移動速度の比較

第 2.2 節で述べたように、斜面崩壊予測法は地表面移動計 (伸縮計) で測定した移動量の使用を前提としているが、内部歪計は地表面移動計と異なり斜面の傾斜量を計測している。このため、内部歪計の有効性を検討するにあたり、内部歪計で計測した傾斜量を前述 (第 5.1 節) の方法で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、地表面移動計で計測した移動量・速度とを比較検討した。

図 34 に長大 30 度マサ斜面のほぼ同じ位置で計測した地表面移動計 (D-4) と内部歪計 (IC-1, 3 ~ 12) の移動量ならびに速度の変化を併記して示す。崩壊時の移動量に約 1 cm 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、移動速度も変化量に違いが見られるが、変化パターンはほぼ同じである。なお、内部歪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、内部歪計の変化量には、実験土槽表面と内部歪計最深部の隙間 (1 ~ 2 cm 程度と思われる) にある土槽部分の変形量が積算されていない。このため、内部歪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。

次に、大型 30 度砂斜面における地表面移動計 (D-1) と傾斜計 (IC-1 ~ 12) の移動量ならびに移動速度の変化を図 35 に示す。移動量変化開始の時間が地表面移動計 (4,200 s)、内部歪計 (5,700 s) とで 500 s の違いがあるが、内部歪計と地表面移動計の曲線の傾向は近似しており、最終的な移動量もほぼ同じ (その差は 0.1 cm) である。移動速度は内部歪計による移動速度に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。なお、図 9 で示すように、この実験では斜面末端部に高さ 35 cm の土留めを設け、土留めのすぐ直前・直後の部分はほとんど変形しない土層構造とした。したがって、土留めの直後に埋設した内部歪計の最深部はほぼ不動部分に設置されていると考えて良い。このために、両者の移動量・速度がほぼ同じ量・パターンを示したのと考えられる。

最後に、大型 30 度マサ砂斜面における地表面移動計 (D-2) と内部歪計 (IC-1, 4 ~ 12) の移動量ならびに移動速度の変化を図 36 に示す。5,400 s 後に地表面移動計の移動量が変化し始め、内部歪計にも同様な時間から変化を始めている。移動速度の変化開始も同様である。また、その後の変化パターンもほぼ同じ傾向を示している。

しかしながら、その変化量にはかなりの差違がみられる。この原因は、前述の長大 30 度マサ斜面におけるケースと同様と考えられる。すなわち、斜面底面付近にある IC-2 と IC-3 が欠測のため、この深さ付近の変動量が積算されていないことと、内部歪計を土留めから離れた位置

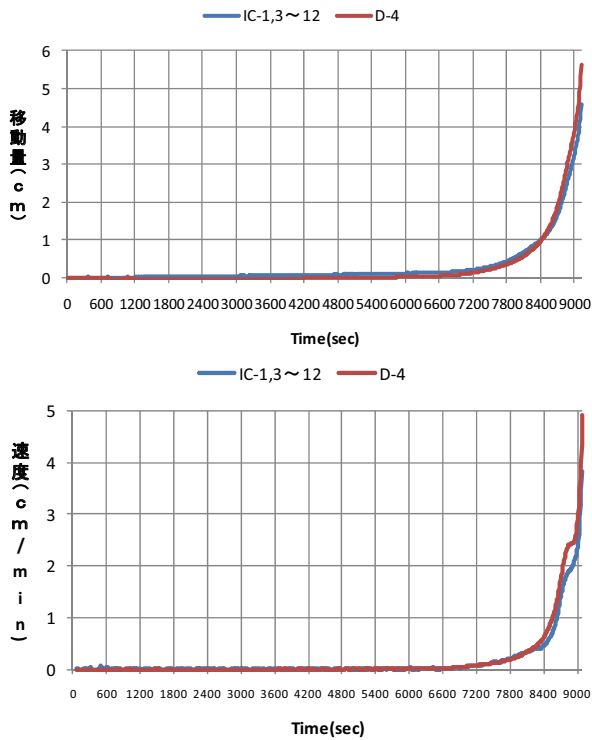


図 34 長大 30 度マサ斜面における地表面移動計と内部歪計の移動量と速度の変化
 Fig. 34 Variation of travel distance (upper) and velocity (lower) with time by two different method (extensometer and multiple inclinometer) in case of extralarge-scale Masa slope of 30 degree.

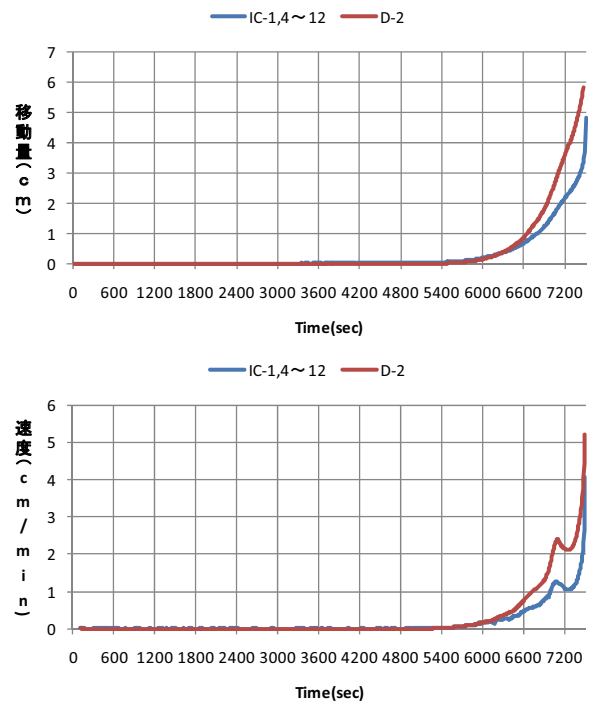


図 36 大型 30 度マサ斜面における地表面移動計と内部歪計の移動量と速度の変化
 Fig. 36 Variation of travel distance (upper) and velocity (lower) with time by two different method (extensometer and multiple inclinometer) in case of large-scale Masa slope of 30 degree.

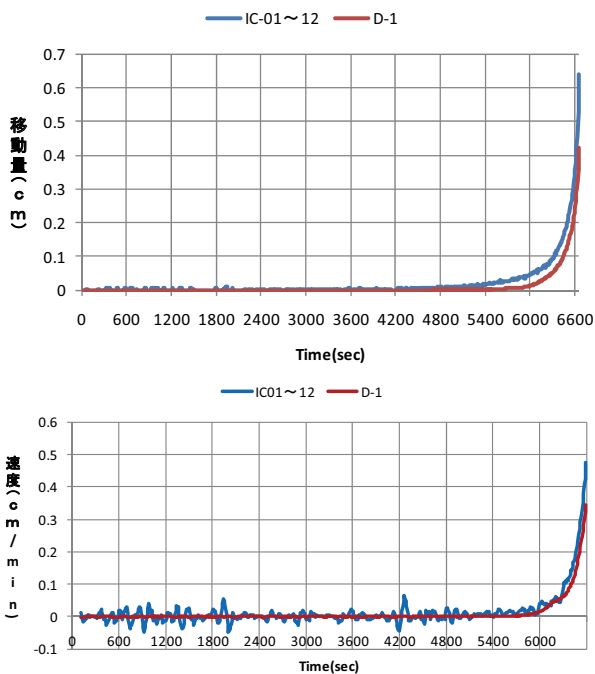


図 35 大型 30 度砂斜面における地表面移動計と内部歪計の移動量と速度の変化
 Fig. 35 Variation of travel distance (upper) and velocity (lower) with time by two different method (extensometer and multiple inclinometer) in case of large-scale sand slope of 30 degree.

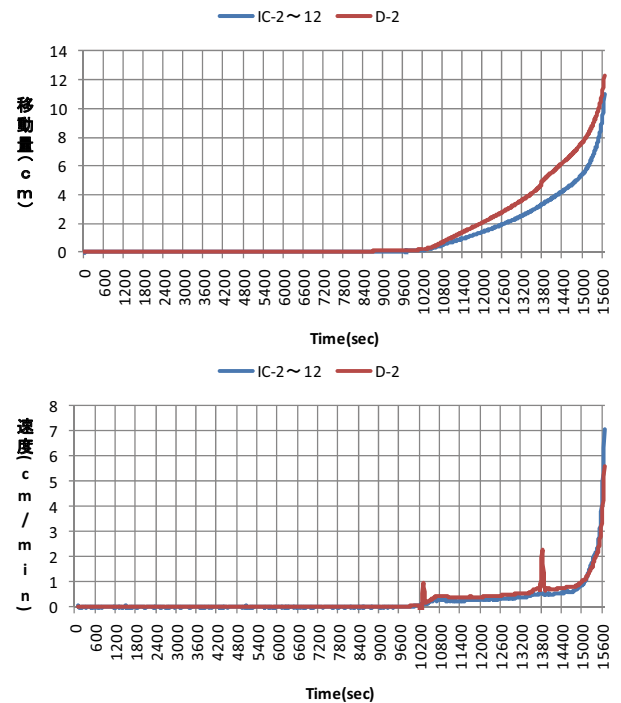


図 37 大型 40 度マサ斜面における地表面移動計と内部歪計の移動量と速度の変化
 Fig. 37 Variation of travel distance (upper) and velocity (lower) with time by two different method (extensometer and multiple inclinometer) in case of large-scale Masa slope of 40 degree.

に設置したことにより、最深部が固定状態にないことであると考えられる。

その他の大型 40 度マサ土斜面 (図 37) や中規模斜面の実験においても同様な結果が得られており、内部歪計による移動量計測の有効性を示すものと考えられる。特に、変化パターンが酷似していることは、変化量ではなく変化パターンを用いて崩壊時期を予測する逆数予測法のデータとして利用可能であることを意味する。

5.2.3 平均速度と加速度の関係

福園 (1990)⁵⁾ は逆数予測法を開発するにあたり、崩壊の最終段階における斜面の移動速度と加速度の関係を検討し、その結果を予測の理論的根拠としたが、ここでは、実験開始から崩壊までの全期間について速度と加速度の関係を検討した。

図 38 は長大斜面崩壊実験 (第 4.1 節) での地表面移動計 (左列 D-4) と内部歪計 (右列 IC-1, 3 ~ 12) の速度と加速度の関係を比較したものである。縦軸に加速度 (cm/min²)、横軸に速度 (cm/min) をとり、図 34 の速度を元に時間別 (実験開始 0 s ~ 崩壊発生 9,120 s) で分類したものである。内部歪計の速度が若干小さいものの地表面移動計と内部歪計の動きがほぼ同じ傾向を示していることが分かる。

時間別で比較すると、0 s ~ 6,600 s までは速度が 0 であり、地表面移動計及び内部歪計ともに変化が見られない。なお、加速度正方向の変化はセンサーの性能限界によるノイズと思われる。6,600 s ~ 8,840 s までは加速度は一定又は微増減する等加速度的増加がみられる。8,840 s ~ 9,120 s の崩壊発生直前では速度・加速度ともにほぼ直線的に増加している。このように①速度 0、②等加速度的増加、③速度・加速度増加の 3 つに分類でき、他の実験でも同様に 3 つの傾向を示し崩壊に至る。

この関係は、等速度的増加の段階が短いと考えると、福園 (1982)⁷⁾ が関東ローム斜面の崩壊で示した 4 段階 (微増、等加速度的増加、等速度的増加、累乗的急増) と類似しているが、更なる検討を要する。この結果は、第 6 章において、消防活動における避難管理基準の考え方で検討する。

5.2.4 逆数予測法への適用性について

前述したように、これまで斜面崩壊予測に関する研究は数多く行われてきているが、斜面崩壊発生時期の予測に関しては平均速度の逆数曲線を用いる方法 (逆数予測法) が単純明快であり感覚的に分かり易い。この予測法は最終的な斜面崩壊に近づくほど移動速度が大きくなる現象 (クリープ破壊現象における三次クリープの加速現象) を利用する。横軸に時間、縦軸に速度をとった速度 (v) 曲線は右上がりの上昇カーブを描くので斜面崩壊の発生が近づいているのはわかるが、崩壊時期を定量的に求めることは難しい。一方、速度の逆数 (1/v) は、速度が大きくなるにつれ次第に小さくなるので、その曲線は右下がりとなり、崩壊時間では時間軸に接するようになる。したがって、途中段階で、それまでに得られている曲線を延長して時間軸との交点を求めれば、その交点が崩壊予測時間となる。また、時間軸に接近する度合いから崩壊

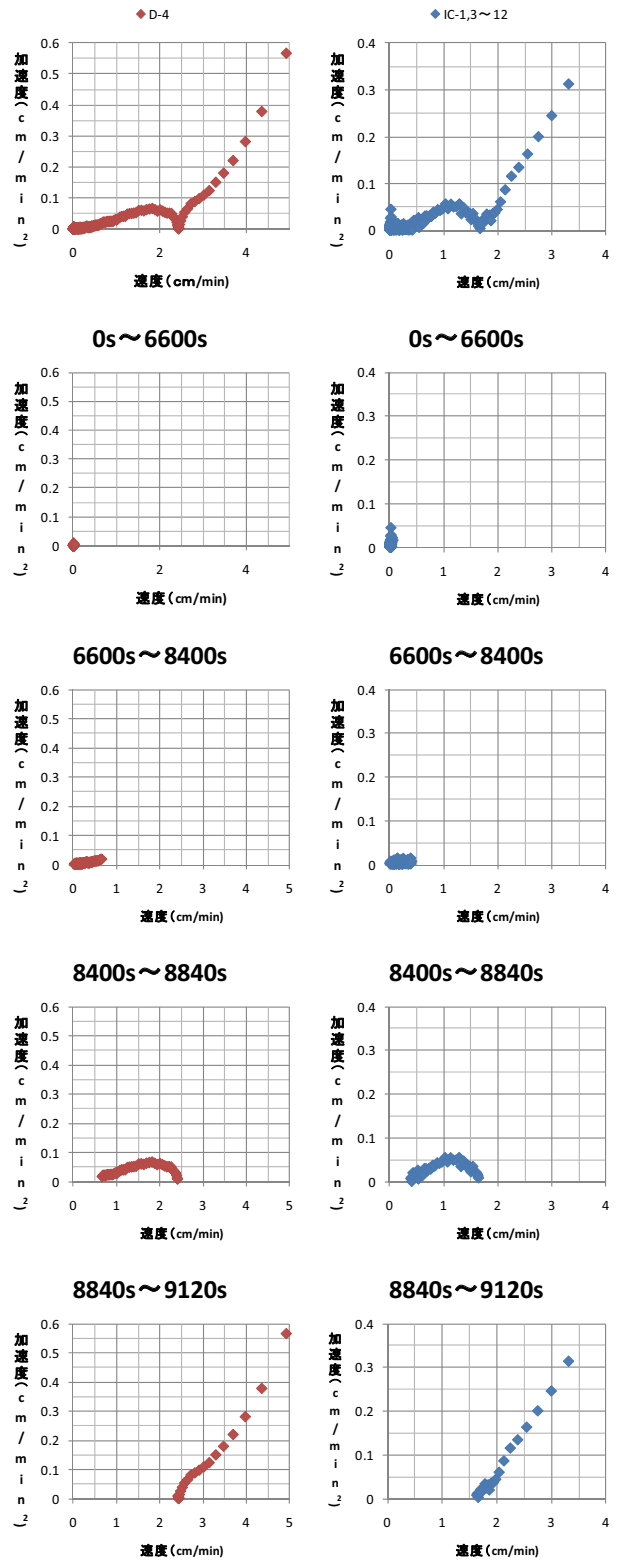


図 38 長大斜面における速度と加速度の変化比較図
 Fig. 38 Relation of velocity and acceleration on each time in case of large-scale slope.

発生の切迫度を感覚的に知ることができる。ただし、当然のことながら速度が無限大になることはなくその前に崩壊するので、そのことを考慮にいれなければならない。

図 39 は長大 30 度マサ斜面 (第 4.1 節) の地表面移動計

(D-4) と内部歪計 (IC-1, 3 ~ 12) で計測した崩壊発生 40 分前 (6,720 s) からの速度の逆数曲線を示したものである。地表面移動計が 7,320 s まで、内部歪計は 6,720 s から 7,680 s まで急激に変動しているが、その後は緩やかな減少になり崩壊に至る。7,680 s 以降二つの曲線はほぼ同じ傾向を示していることから、地表面移動計による予測と内部歪計による予測とでほぼ同じ結果が得られることが分かる。「第 5. 2. 2 項 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」で示した結果から類推されるように、他の実験でも地表面移動計と内部歪計による移動量の変化パターンが類似であるので、ほぼ同様の結果が得られている。このことは、内部歪計 (傾斜計) による計測値を、逆数予測法へ適用出来る可能性のあることを示すものである。

次に、図 40 は崩壊発生前 20 分間 (図 39 の 7,920 s ~ 9,120 s) を拡大し、曲線から崩壊時刻を予測したものである。崩壊発生よりも 1 分 ~ 2 分早い予測になるが、福園 (1990)⁵⁾ が指摘しているように、崩壊発生を早めに予測することは、防災上、安全側の判断となるので問題は少ないと考えられる。

5. 2. 5 深さ毎の逆数曲線の変化 (内部歪計による)⁸⁾

図 41 は大型 30 度マサ斜面 (第 4. 3 節) の内部歪計 (IC1, 4 ~ 12) によるそれぞれの深さにおける速度の逆数を崩壊発生 20 分前 (崩壊発生 7,500 s) から示したものである。当初、各深さで「ゆらぎ⁹⁾」を見せ、それぞれが大きさの異なる値を示していたが、7,100 s 過ぎから一様な変動になり崩壊時刻へ向かって減少しており、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。このことは、内部歪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。第 5. 1 節で深さによる角度変化量を示し、比較的变化が大きい場所は底面近くのすべり面付近と表面付近であることから推察される。それでも、変化量の大きいすべり面付近に埋設できれば、ノイズレベルも低くなるので、有効性が高くなることは自明である。

6. 消防活動への応用

6. 1 現在の土砂災害消防活動と問題点

土砂災害警戒避難ガイドライン¹⁰⁾に防災活動における二次災害防止の留意事項として、「災害発生後の防災活動にあっては、二次災害のおそれがあることから、監視員の配置やセンサー等を設置し、安全確保を徹底する。」としている。東京消防庁消防活動要領¹¹⁾にある土砂災害に係る消防活動要領において、二次崩壊については活動周辺における斜面の変動等の二次崩壊の前兆現象の把握を重点に、監視員を二人で目視による監視を行う二重監視方式により監視警戒態勢を強化するとしている。しかし、前兆現象である湧水や斜面はらみだしの異常な状況は、通常の状態を知っている地域住民や地元消防団にしか知りえない情報であり、隊員が判断するのは困難で

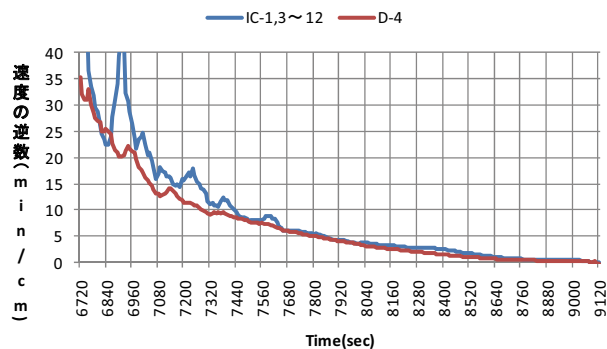


図 39 長大 30 度斜面における地表面移動計と内部歪計の速度の逆数変化量

Fig. 39 Variation of reciprocal velocity with time by extensometer and multiple inclinometer in case of extralarge-scale slope of 30 degree.

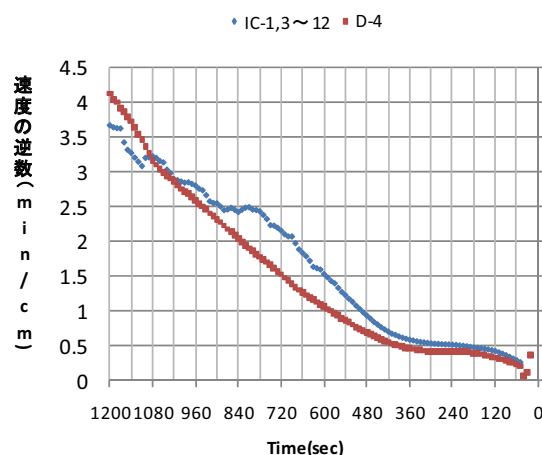


図 40 図 39 の拡大図

Fig. 40 Close up in Figure 39.

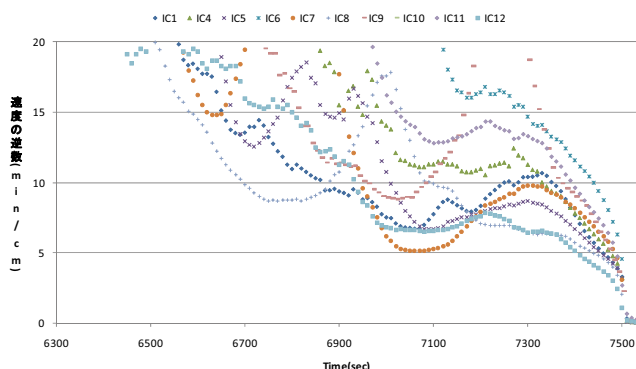


図 41 大型 30 度マサ斜面での内部歪計速度の逆数

Fig. 41 Variation of reciprocal velocity with time by multiple inclinometer in case of large-scale Masa slope of 30 degree.

ある。また、崩壊で地形が変化している状態では、住民や消防団でさえ異常な状況と判断することができない可能性もある。さらに、目視による監視は、各監視員個人の主観的な思考が入る。かといって、監視員一人による長期の監視は非現実的である。また、がけ崩れに限って言えば、斜面のはらみ出しや移動は極微小（前述の実験では移動距離は最小で約1 cm）であるために、危険要因を見過ごす可能性が高い。さらに、夜間での目視による監視は更に困難となる。他に、監視する場所にも問題がある。遠方からの監視では全体が把握でき監視員の安全は確保されるが、微小な変形を見極めるのは困難である。至近距離での監視では微小な変形を監視できても崩壊に巻き込まれる危険があり、安全ではない。遠方の安全な場所から目視による監視で斜面全体の把握に努めるとともに、監視用のセンサーで微小な変形を捕え、定量的で客観的な指標による安全確認体制を確保することが理想的であるといえる。斜面崩壊の発生メカニズムは、間隙水圧の増加、自重の増加等の色々な素因と地質構造が絡むため、たとえ1つのセンサーが設置出来たとしても、斜面崩壊の前兆現象を確実に捉えることが出来ず、正確に斜面崩壊を予測することは困難である。しかし、上記理由により、目視による監視だけに頼るのではなく、活動中の避難判断の一つの材料として監視用センサーとそれに合った定量的な避難管理基準を検討することは必要であると考える。

6.2 避難管理基準

地すべり防止技術指針¹²⁾では地すべり活動状況に応じた警戒体制について言及している。この中で、避難警戒管理基準は地表面移動計の計測によって判断されている（表3）。傾斜計は計測結果から地すべり運動判定の基準として用いられている（表4）のみで、管理基準値の設定はない。

試みとして、この管理基準を、大型30度砂斜面の実験（第4.2節）における内部歪計（IC-1～12）と地表面移動計（D-1）を適用した結果を図42に示す。地表面移動計は約6,450 s後に管理基準が「注意」、約6,570 s（崩壊発生まで約1分）に「避難」になったのと同様に、傾斜計は実験開始6350 s後には「注意」、6,520 s（崩壊発生まで約2分）で「避難」となり地表面移動計とほぼ同じような結果となる。しかし、この実験結果のように、微小な移動量で崩壊に至る場合は、安全に避難する時間的余裕はほとんどない。図42の下の図の内部歪計の分解能は地表面移動計より低く、さらに地球潮汐・気温地下水位などの影響を受けることにより誤報となってしまう可能性もある。救助活動を行う上で、二次崩落の危険を考慮し身を守らなければならないが、この状況では活動時間が制限され活動ができない。このことから、自明なことではあるが、既存の緩慢な動きの地すべりに対する避難警戒管理基準を切迫した状況の斜面崩壊の二次崩壊に適用することには無理がある。また、当然のことながら、内部歪計（傾斜計）データをもとにした何らかの基準も存在しない。そのため、次節以降で、傾斜計で計測した速度・加速度の関係から、新しい避難警戒管理基準について考察した。

表3 地表面移動計観測結果による管理基準値例

Table 3 Management criteria by extensometer observation.

管理基準	注意	警戒	避難	立入禁止
	1 mm/D	10 mm/D	2 mm/h *2 h 4 mm/h	10 mm/h

※ D: 日オーダー h: 時間オーダー *2h:2時間継続

表4 地盤傾斜計地すべり運動判断基準例

Table 4 Landslide movement criteria by the ground inclinometer.

日平均変動量	累積変動値	地すべり活動判断
5 秒 /D	100 秒 /M	活発に運動
1～5 秒 /D	20～100 秒 /M	緩慢に活動
1 秒 /D 以下	20 秒 /M 以下	連続観測が必要
3 秒 /D 以上	なし	局部的な地盤変動・その他

※ D: 日オーダー M: 月オーダー

6.3 速度・加速度の関係による避難管理の検討

逆数予測法は速度と加速度がともに増加する3次クリープ段階でのみ適用可能な予測法である。このため、3次クリープ段階の期間が短く移動量が微少な場合には適用できない可能性がある。そこで第5.2.3項で述べた速度・加速度の3つの段階区分（図38）を利用する方法を検討した。第一段階は速度も加速度も変化なし（速度0）。第二段階は速度が上昇、加速度が一定あるいは緩やかに増減（等加速度的増加）。第三段階は速度加速度が急激に上昇である（速度加速度増加）。

第一段階は斜面に変化が無い状態であり、消防活動が可能である（「安全」）。第三段階は崩壊まで約1分以内の崩壊直前の状態であり、緊急に避難する必要があるが避難することはほぼ無理である（「立入禁止」）。それ以前の第二段階で消防活動を停止し避難することが良いと考える。そこで、第4.2節大型30度砂斜面における速度加速度の関係を図43～46に示す。5,900 s～6,550 s（崩壊発生の12分前から1分前）で等加速度的増加がみられる（図45）。

図47はそれを基に作成したが、図42と比較すると若干ではあるが早期に避難させることが可能である。「斜面崩壊がいつ発生するのか」は重要なことではあるが、この斜面が「危険な状態であるのか或いはそうではないのか」が一刻を争う現場では必要になる。この傾向を察知できれば「危険な状態になった」と考え崩壊発生前に「立入禁止」にし避難することは可能であり、再び速度0の状態になれば「安全」と考え、活動を再開する根拠にもできる。しかし緩慢に動く場合は常に「立入禁止」の状態が持続してしまうことや、センサーの温度変化の影響対策等、実用化するにあたって解決すべき課題は数多く残されている。

6.4 内部歪計による消防活動時の斜面監視

本研究で使用した内部歪計は計測用のケーブルを必要とする。また、地盤内部に設置しなければならないので、危険な場所での設置作業が必要になる。しかし無線通信技術の進歩により、必ずしも計測ケーブルを必要としな

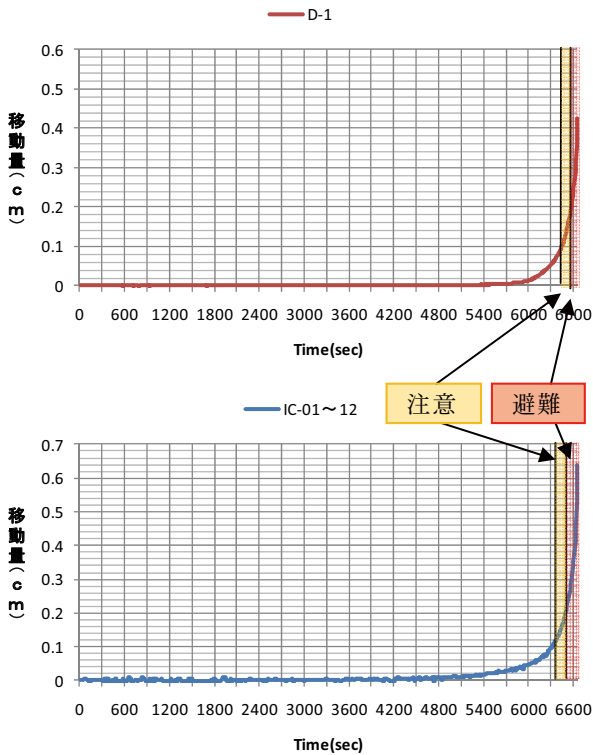


図 42 地表面移動計と内部歪計の管理基準の対比
 Fig. 42 Comparison with landslide movement criteria of extensometer and multiple inclinometers.

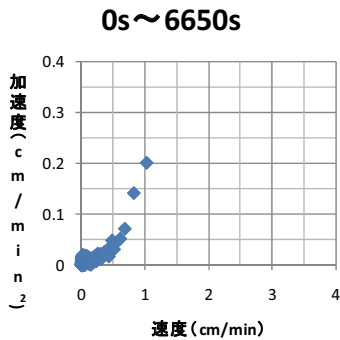


図 43 大規模斜面崩壊実験における速度加速度の関係 (実験開始～崩壊発生まで)
 Fig. 43 Relation of velocity and acceleration in large-scale slope failure experiment (All processes from the experiment beginning to the collapse).

いようになったことや、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崩壊時刻予測法の適用が可能
 であることが明らかになった (第 5.2.5 項) ことより、斜
 面のはらみ出しが発生しやすい斜面下部付近に、地表面
 から 1 m 以内の多数点に設置して無線によりデータを転
 送するなどの方法をとることで、設置をより安全に遂行
 でき、かつモニターにより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。これにより、第 6.3 節で

0s ~ 5900s

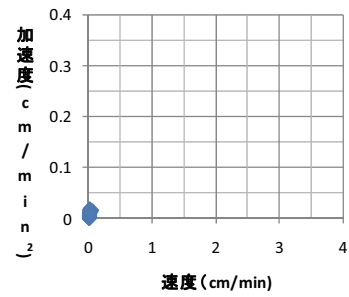


図 44 0 s ~ 5,900 s までの速度加速度の関係 (速度 0)
 Fig. 44 Relation of velocity and acceleration from 0 s to 5,900 s (velocity=0, no movement).

5900s ~ 6550s

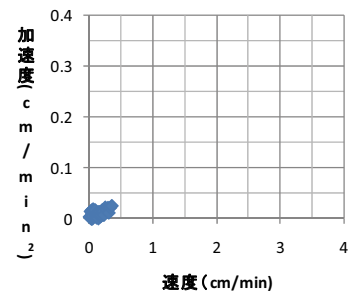


図 45 5,900 s ~ 6,550 s までの速度加速度の関係
 (等加速度的増加)

Fig. 45 Relation of velocity and acceleration from 5,900 s to 6,550 s (Constant acceleration).

6550s ~ 6650s

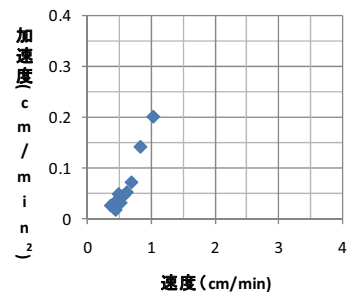


図 46 6,550 s ~ 6,650 s までの速度加速度の関係
 (速度・加速度増加)

Fig. 46 Relation of velocity and acceleration from 6,550 s to 6,650 s (velocity and acceleration: increasing rapidly).

述べた方法で危険を察知するとともに、第 5.2 章で述べ
 た逆数予測法により崩壊発生時刻を予測することが理想
 である。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¹³⁾と併用すれ
 ば内部歪計の設置が困難な急傾斜の斜面などでも監視す
 ることが可能となり、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。

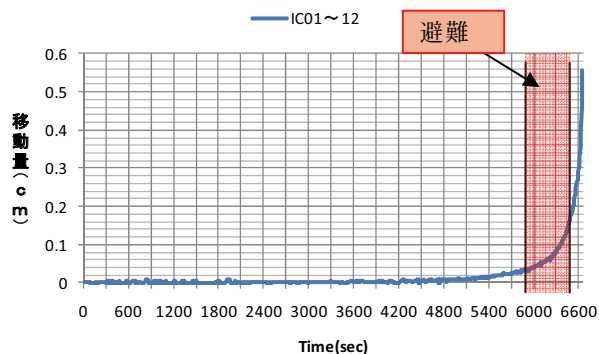


図 47 速度加速度の関係を考慮し新しく提案した避難基準
Fig. 47 Proposal criteria with relation velocity and acceleration.

7. まとめ

本研究は内部歪計（傾斜計）を斜面崩壊災害発生時の消防活動における二次的災害監視の装備として応用出来るかどうか検討することを目的として行ったものである。まず、防災科学技術の大型降雨実験施設を利用した降雨による斜面崩壊実験の中で、内部歪計による内部歪（角度変化）の計測を行った。得られた計測結果を、一般的に地すべりの変動量監視等に広く使用されている地表面移動計による表面移動量の計測結果と比較検討するとともに、斜面崩壊発生時期予測に使われている逆数予測法への適用可能性について検討した。その結果以下のことが明らかとなった。

1. 地表面移動の開始時期と内部歪計による角度変化の開始時期はほぼ同じであった。
2. 角度変化量は斜面底面（すべり面）付近が最も大きく、斜面表面でも比較的大きい角度変化が見られた。
3. 内部歪計の角度変化量から求めた移動量・移動速度の変化量は地表面移動計によるそれとほぼ同じで、特にその変化パターンは酷似していることが明らかとなった。
4. 内部歪計による移動量を逆数予測法に適用した結果、地表面移動計による予測結果とほぼ同じ予測結果がえられることが分かった。このことより、内部歪計による計測結果を崩壊時期予測に適用できることが明らかとなった。
5. 斜面末端部付近に設置した内部歪計で計測したそれぞれの深さにおける速度の逆数は、大きさは異なるが、その変化パターンはほぼ同じであり、任意深さの計測データで崩壊時刻の予測が可能であることが明らかとなった。
6. 内部歪計と地表面移動計で計測した速度・加速度の関係を整理した結果、①速度0 ②等加速度的増加③速度加速度増加の3つの段階に分けられることが分かった。この結果を基に、消防活動時における二次災害防止のためには、②の段階で避難することが有効であるという内容の避難管理基準（試案）を提示した。

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内部歪計（傾斜計）が斜面崩壊時の消防活動の二次災害防止に利用できる可能性のあることが明らかになった。しかし、実用化にあたっては解決すべき課題も多く残されている。今後、センサーの改良（小型化・低廉化など）も考慮に入れ、更なる実験での検証や現地斜面等での使用実績を重ねる必要がある。

8. おわりに

本研究は防災科学技術研究所が推進している「MP レーダを用いた土砂災害・風水害の発生予測に関する研究」プロジェクトの一環として行ったものである。本稿の筆頭著者は東京消防庁からの委託研修性として本研究を行った。平成21年度から平成22年度まで2年間の有意義な研究ができたことは、森脇氏や小倉氏をはじめとした防災科学技術研究所の皆様からの温かいご援助を頂いたからである。末尾ながら、ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 土佐山田町(1973)：昭和47年7月豪雨繁藤山くずれ災害記録，土佐山田町
- 2) 土砂災害警戒避難に関わる前兆現象情報検討会(2006)：土砂災害に関わる前兆現象情報の活用の方について (http://www.mlit.go.jp/river/sabo/kondankai/zencho/060331_s1.pdf)。国土交通省河川局砂防部砂防計画課
- 3) 玉置晴朗，矢澤正人，酒井直樹，植竹政樹，福園輝旗，高橋宙，松本健作(2009)：警報と観測のためのスペクトラム拡散・長距離通信技術の野外実験。平成21年度砂防学会研究発表会概要集，540-541。
- 4) 斎藤迪孝(1966)：斜面崩壊時期の予知。地すべり，第2巻，第2号，7-12。
- 5) 福園輝旗(1990)：平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予測－斜面崩壊の予測に関する研究(3)－。防災科学技術研究所研究報告第46号，45-81。
- 6) 豊澤康男，伊藤和也，TAMARAKAR.S.B，三田地利之，国見敬，西條敦志，大久保智美(2008)：半導体加速度センサーを利用した高精度傾斜計による斜面崩壊予知の検討。労働安全衛生研究，Vol.1, No.2，103-110。
- 7) 福園輝旗・寺島治男(1982)：降雨による粘性土斜面の崩壊実験。国立防災科学技術センター研究所研究報告，第29号，103-121。
- 8) 福園輝樹(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，130-131。
- 9) 福園輝樹，酒井直樹(2008)：斜面変動速度のゆらぎと崩壊時期予測について。平成20年度自然災害学会学術講演会学術講演会概要集。
- 10) 国土交通省(2007)：土砂災害警戒避難ガイドライン，国土交通省砂防部。

- 11) 東京消防庁：土砂災害に係る消防活動要領，28，1-7.
12) 国土交通省(2008)：地すべり防止技術指針，国土交通省砂防部.
13) 独立行政法人消防研究所(2006)，斜面崩壊現場の二次崩壊危険度予測手法に関する研究報告．消防研究所資料第 70 号，65pp.

(原稿受理：2010 年 5 月 24 日)

要 旨

現在の斜面崩壊発生時刻予測法は地表面移動計（伸縮計）による計測が基に行われているが，現地斜面では設置・観測が難しい場合もあり，他のセンサによる斜面観測研究が盛んに行われている．本研究では，内部歪計（傾斜計）による斜面崩壊発生予測法を確立することを目的とし，当研究所が保有する大型降雨実験装置で規模の異なる斜面崩壊実験を行った．その結果，福圍方式による斜面崩壊時刻の予測法の適用は可能であることが明らかになった．そこから土砂災害発生時消防活動での監視技術への応用を検討した．

キーワード：模型実験，斜面崩壊，予測，内部歪計，消防活動