

9. レーザー光と光センサーによる斜面崩壊の事前予測・崩壊システムの開発\*  
伊藤和也\*\*, 豊澤康男\*\*, 武山峰典\*\*\*, 佐野哲也\*\*\*

9. Development of a Monitoring and Alarm System for Slope Failure  
Using a Laser Beam and Optical Sensor.

by Kazuya ITOH\*\*, Yasuo TOYOSAWA\*\*,  
Minenori TAKEYAMA\*\*\* and Tetsuya SANO\*\*\*

**Abstract;** Accidents due to slope failures frequently occur at excavation sites. In Japan, approximately 20 workers are killed each year by slope failure or rockfall during slope cutting work. Lives could be saved and damage reduced if early warning of slope failure could be made. Although many monitoring instruments for landslides have been developed to measure the movement of the slope just before failure, most of them are either difficult to set up in the field or are too expensive to use in small- to medium-sized slope cutting sites. To prevent accidents due to slope failures, it is necessary to develop a system for monitoring small- to medium-sized slope cutting sites.

In this study, a slope failure monitoring and warning system using a laser beam and optical sensor was developed and its application was examined. Firstly, the laser beam and optical sensor were selected to satisfy the requirements of a precise measurement system with simple installation in the field at low cost. Based on trial tests, an amorphous silicon optical sensor, 635 nm laser beam, and sharp cut filter (transition wavelength: 620 nm) were selected in this study. Next, a model test of slope excavation was carried out to investigate the slope movement just before failure. The height, width and slope angle of the model slope were 2.2 m, 1.35 m, and 60 degrees, respectively. The results showed that the relationship between the output voltage of the optical sensor and deformation of the slope was found to be linear within a limited range. Finally, a monitoring and warning system for slope failure was developed based on these results.

**Keywords;** Slope stability, Labor accident, Monitoring and alarm system, Laser beam, Optical sensor,

---

\* 第44回日本地すべり学会研究発表会講演集 (pp.369-372), 土木学会論文集 (C部門, vol. 63, No.2, pp.502-515) で一部発表

\*\* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

\*\*\* 大成基礎設計株式会社 Taisei Kiso Sekkei Co. Ltd.

## 1. はじめに

我が国は国土の70%以上が山地や丘陵地で占められている。その地質学的特徴として世界有数の変動帯に位置し、激しい地殻変動による急峻な地形と脆弱で複雑な地質構造が挙げられる。また、気象条件として梅雨、台風等に伴う集中豪雨や、寒冷地帯の凍結融解等があり、斜面は地すべり・崖崩れ・落石・土石流といった自然災害が発生しやすい環境にある。一方、我が国の鉄道や道路などの主要な交通網は、山間部や海岸沿いの急斜面下を通過するものが多く存在する。また、都市域の拡大に伴う開発は丘陵から山麓に及び、斜面や崖に近接して多数の住宅が建設され、高度で過密な土地利用がなされている。そのため、土砂崩壊災害の危険性と背中合わせとなっているケースが多々ある。実際に斜面崩壊に絡んだ大きな事故もこれまで数多く発生しているが、崩壊という現象に対する調査や計測事例がきわめて少なく、崩壊に至るメカニズムは未だ明らかにされていない<sup>1)</sup>。このような斜面崩壊に対しては、その安定性を評価し、崩壊の危険性を予測することで崩壊を未然に防ぐ手段を講じることや、仮に崩壊が生じた場合でもその被害を最小限に抑える措置を執ることが重要である。それを実現するためには、崩壊に至る前兆現象をすばやく捉え、的確な対策を検討するために必要な資料を与える計測技術の完備は欠かせない<sup>2)</sup>。

一般的に斜面崩壊発生の誘因は、豪雨や地震のような自然現象と建設工事等の人為的なものの2種類に分けることができる。前者の誘因については、近年発生している様々な自然災害により注目され、傾斜計・伸縮計による従来の測定<sup>3)</sup> 以外にも新しい計測手法の開発や提案が多くの研究者によりされている。例えば、崩壊の危険性のある斜面の安全性監視手法では、光波・写真測量<sup>4)</sup>、

光ファイバー<sup>5)</sup>、マイクロ波<sup>6)</sup>、アコースティックエミッション<sup>7)</sup>、Global Positioning System (全地球測位システム、以下、GPS) <sup>8)・9)</sup>等を利用した計測器などが開発され、現地への適用が試みられている。また、岩盤斜面のように計測器を設置することが困難な斜面には計測器の設置などが必要とされないノンプリズム型レーザー変位計<sup>10)</sup> や画像解析による計測手法<sup>11)</sup> も適用されている。次に、後者の誘因については施工中の切土法面の動態観測の方法として、工事規模やコストとの影響度合いを考慮しながら、様々な観測方法が採用されている<sup>12)</sup>。最も簡易な動態観測としては、法面点検、モルタル溝、見通し線、ぬき板に代表されるような日常点検の中で誰にでも変位の状態が確認できる方法が挙げられる。また、より精密な計測器を使用したものとしては、伸縮計、傾斜計等による地表面計測の他に、孔内傾斜計やパイプ歪み計といった地中計測が行われている場合もある。このような計測器を利用した動態観測は、一般的に大規模な切土法面の工事現場において採用されていることが多い。ところで、切土掘削工事中の斜面崩壊による労働災害の死者数は、毎年20件前後で推移している (Fig. 1) <sup>13)</sup>。斜面崩壊による労働災害は、道路拡張工事や急傾斜地対策工事に多く見られ、重力壁などの対策工する施工時に法面が急勾配となることや、床付け作業を行うために法尻部を掘削するような施工を行っている際に多く発生している (Fig. 2) <sup>14)</sup>。伊藤らは、過去13年の労働災害事例を分析した結果、このような労働災害が発生した工事現場は請負金額、工期、作業人数がいずれも小さな、いわゆる中小規模工事であり、計測器による動態観測はほとんど行われていないことを確認している<sup>15)</sup>。これらの背景には、経費に余裕のない中小規模工事現場でも利用可能な簡易かつ廉価な動態観測システムが整備されていないことが考えられる。そこで、本研究は、経費に余裕の

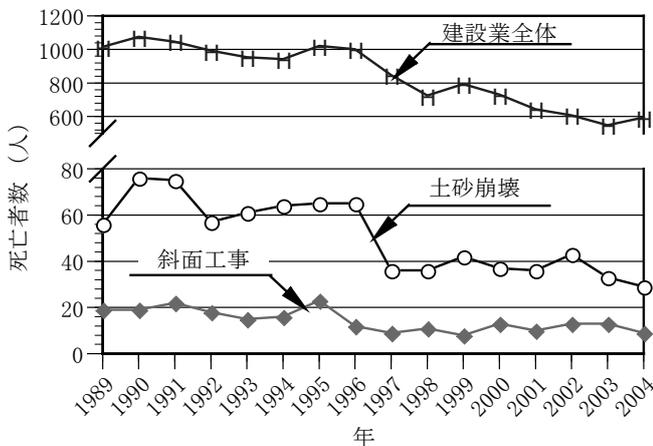


Fig. 1 Annual occurrence of number of labor accident cases during the construction works.  
建設業における労働災害の年度別死亡者数<sup>13)</sup>



Fig. 2 Typical examples of slope failure.  
建設工事中の斜面崩壊による労働災害事例<sup>14)</sup>

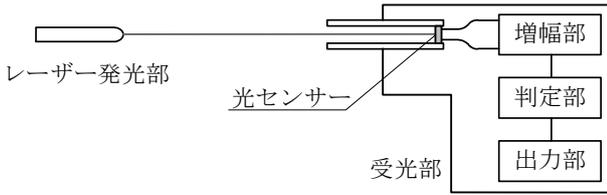


Fig. 3 Basic pattern of system.  
システムの基本パターン

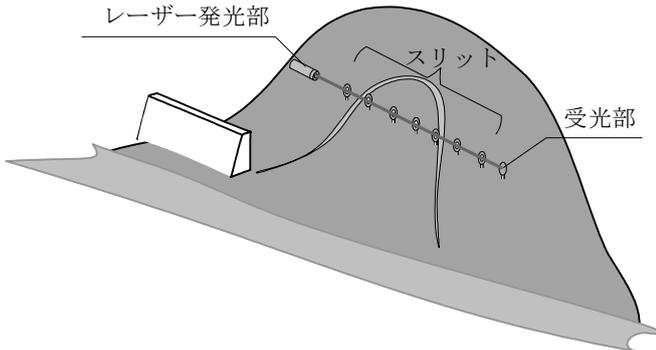


Fig. 4 Digitization method of transit.  
見通し線をデジタル化する方法

ない中小規模工事でも将来的なコスト低減により安易に利用可能な動態観測システムの開発を目的として、レーザー光と光センサーを利用した変位計測システムの開発・試作を行った。本報は、システムの概要と適用方法の紹介をはじめに行う。その後、光センサーの性能確認試験結果、重力場模型実験による斜面崩壊実験や強制変位実験での計測事例を通して、土砂崩壊検知システムを試作し、適用性について検討を行った。

## 2. 開発したシステムの概要

### 2.1 システムの概要

今回開発したシステムの基本パターンをFig. 3に示す。本システムはレーザー発光部、レーザー光を受光する光センサー受光部から構成される。これらは、それぞれレーザーポインターモジュール、太陽電池基板のような普及品を有効利用することでコストを下げることをねらったものである。本システムを利用することで以下の方法により土砂崩壊の前兆現象を把握することを考えた。

#### 2.1.1 「見通し線」をデジタル化する方法

特別な計測器を使わずに地表面で滑り土塊の移動を計測する方法として移動杭や目印の「見通し」による方法がある。これは、移動する可能性のある、または移動している区域に杭や目印を設置し、その動きをもって土塊の移動量とするものである。計測する場合には、一般的にはトランシット等の測量により直線性や角度のズレを

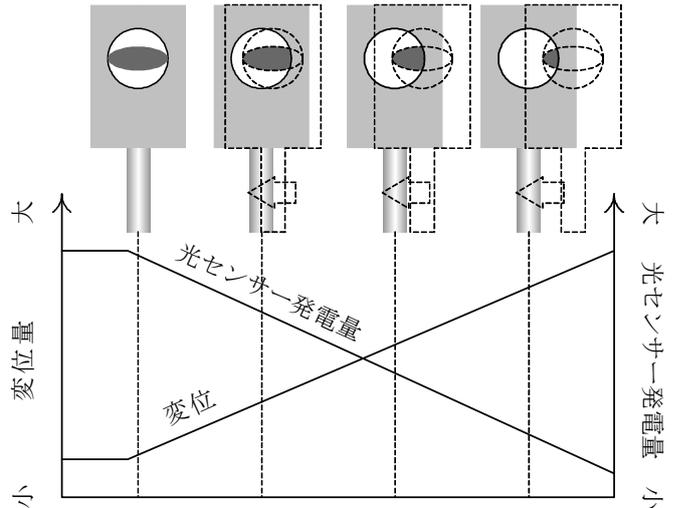


Fig. 5 Measurement method from voltage change.  
スリットによる発電量の低下から変位を計測する方法

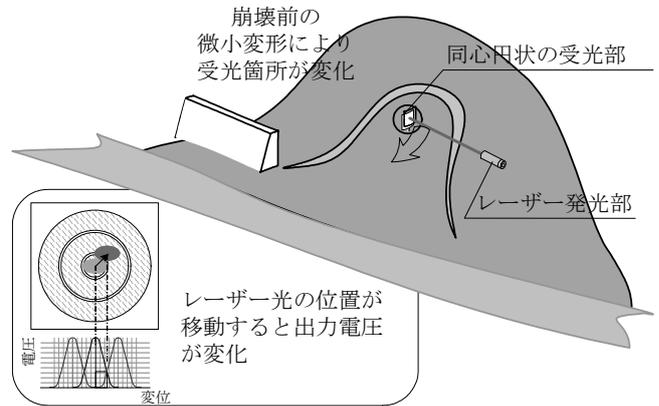


Fig. 6 Measurement method using a concentric circle optical sensor.  
3素子が同心円状に配置されたセンサー

計測している。このような「見通し線」による移動土塊の計測方法に本システムを適用すると、Fig. 4に示すようなものとなる。まず、一直線にレーザー光が通過できるように任意の径の穴があいている板を並べておく。地盤が変形してレーザー光が穴を外れてしまうとレーザー光が光センサー受光部に到達しなくなるため、発電量が低下する。その低下量を閾値として、何らかの警報を発するような土砂崩壊検知システムである。

#### 2.1.2 発電量の低下から変位を計測する方法<sup>16)</sup>

「見通し線」をデジタル化する方法は、レーザー光と光センサー受光部の間に多くのスリットを入れることにより、土砂崩壊が発生したことをON/OFFで知らせるものである。スリットが完全にレーザー光を遮断するまでの挙動はアナログ的である。すなわち、地盤の変形によりスリット板から透過するレーザー光が部分的に遮断され、光センサー受光部に到達するレーザー光の面積が

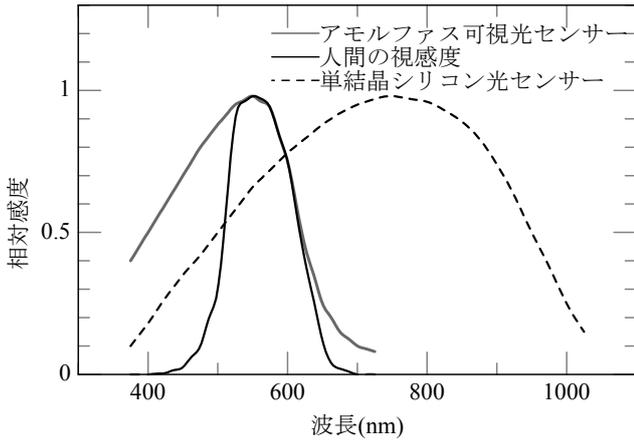


Fig. 7 Spectrum sensitivity of amorphous silicon.  
アモルファス光センサーの分光感度<sup>17)</sup>

減少して発電量が低下する (Fig. 5)。本手法は、このような受光部の発電量と変位の関係から、発電量の低下をもとに変位量を推定・閾値として何らかの警報を発するシステムである。

2.1.3 同心円状に分割した素子を利用して変位量を計測する方法

上述の検討では、1素子の光センサーによる発電量の変化によって動態観測システムを構築していた。しかし、1素子の場合には、スリット径の大きさとレーザー光のビーム径によって無反応領域が出来るなど実際に使用するには幾つかの問題点が考えられた。これらの問題を解消するために、スリット板を使用せず、3素子の光センサーが同心円上に配置するようなセンサーを使用して、それぞれの素子からの発電量の相対的な量によって変形を把握し、閾値として何らかの警報を発するシステムが着想された (Fig. 6)。

本研究では、(2.1.3) と (2.1.3) の方法についてシステム開発を行った。また、(2.1.3) の方法については、実物大実験結果から閾値を仮定して土砂崩壊検知システムの試作を行った。

2.2 レーザーと光センサーの選定と適用性の検討

2.1.1 光センサーの選定

本研究では、光センサーとして大面積や複雑な形状の太陽電池基板を作ることができる、集積型アモルファスシリコン太陽電池アモルトン (三洋電機社製) を選定した。このアモルトンは、人間の視感度である約400nm～約700nmまでの波長の光に感度を持っており (Fig. 7)、太陽電池以外に可視光センサーとしても利用するセンサーである<sup>17)</sup>。また、出力電流は照度に対して線形性を有しており、高精度の検知が可能である。本研究では、(1) 発電量の低下から変位を計測する方法では普

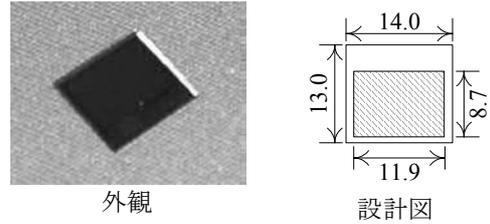
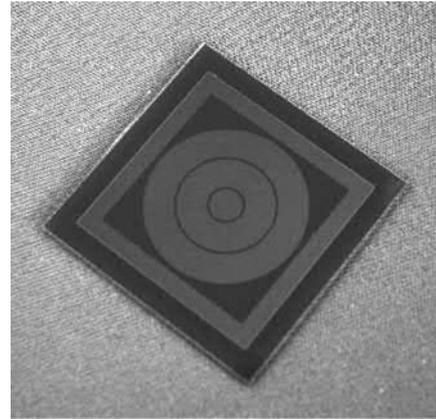
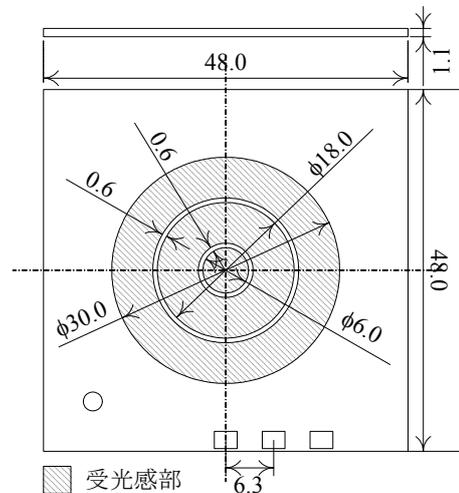


Fig. 8 Amorphous silicon optical sensor AM-30-11.  
アモルファス光センサーAM-30-11



(a) 外観



(b) 設計図

Fig. 9 Amorphous silicon optical sensor C-085-02.  
3分割同心円状アモルファス光センサー C-085-02

及されているアモルファス光センサー (Fig. 8, 機種名: AM-30-11) を、(2) 同心円状に分割した素子を利用して変位量を計測する方法では、1つの基板上に3分割の同心円状となるアモルファス光センサーの試作品 (Fig. 9, 機種名: C-085-2) を使用して、各種実験を行った。アモルファス光センサーは、信号処理として出力される電

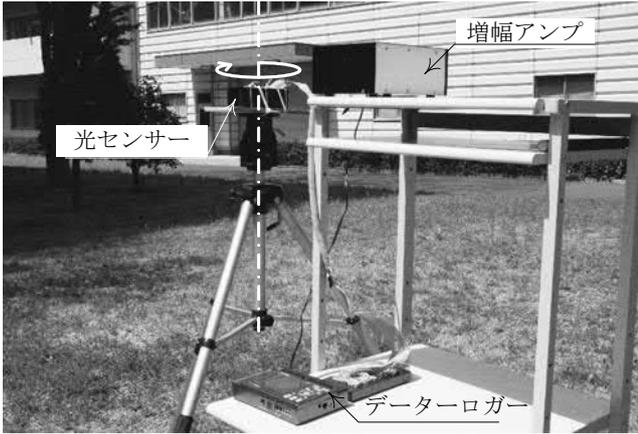


Fig. 10 Field test condition.  
光センサーの屋外検証実験の様子

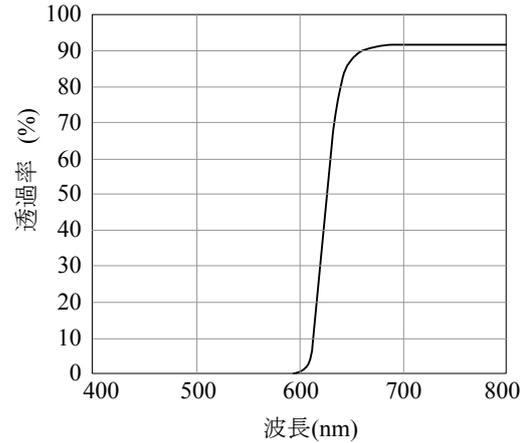


Fig. 12 Intercept performance of sharp cut filter.  
シャープカットフィルターの遮断性能

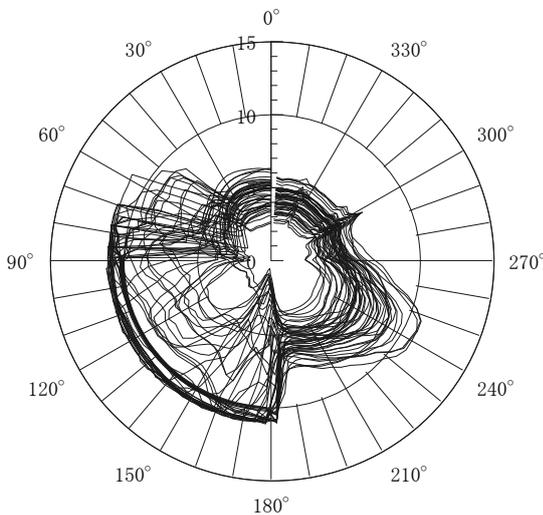


Fig. 11 Output voltage distribution without sharp cut filter and the eaves.  
出力電圧の分布 (フィルター・庇無し)

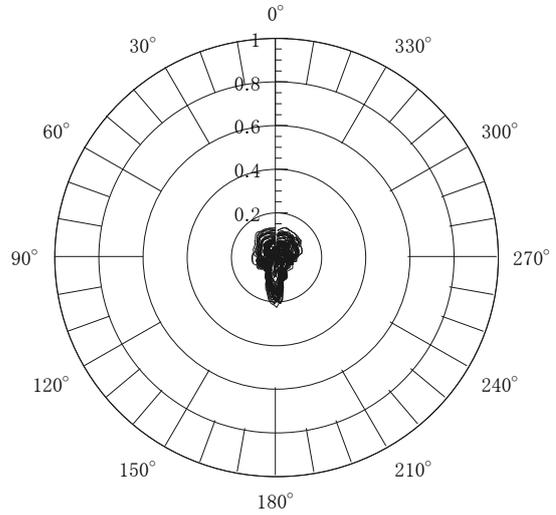


Fig. 13 Output voltage distribution with sharp cut filter and the eaves.  
出力電圧の分布 (フィルター・庇有り)

流をOP (オペ) アンプを用いてリニア増幅を行い電圧に変換し、電圧値をデータロガーにより収録する。

### 2.2.2 レーザー光の選定

レーザー光は、廉価なシステムを構築するために一般的に市販されているレーザーポインターを使用することとした。現在、レーザー光の波長として2種類の赤色光 (650nm, 635nm) と1種類の緑色光 (532nm) が市販されている。アモルファス光センサーの分光感度 (Fig. 7 参照) からは532nmの緑色光を使用するのが最も効率が良い。しかし、現在の緑色光は赤色光に比べてコストが約10倍掛かるため、本研究では赤色光を使用することとし、目視時に650nmに比べて約3倍の明るさを有する635nmのレーザーポインターモジュールを使用した。このレーザーポインターモジュールには焦点調節機能が内蔵されている。

### 2.2.3 太陽光による外乱の検証およびその除去

本研究にて使用した光センサーは、太陽電池や可視光センサーとしての使用を目的としたものであり、雨天でも最低5000 (lux) 以上はある太陽光が光センサーに照射すると発電量が大きくなり、レーザー光の検知を行う際の外乱要因となってしまふ。そこで、太陽光がレーザー光検知に与える影響 (外乱要因) を確認するために、屋外検証実験を行った。検証実験の様子をFig. 10に示す。水平に設置した光センサー受光部を屋外にて360°回転させ、その際の発電量を計測することにより、太陽光の影響を確認した。なお、実験を行った時期および時間帯での太陽の位置は東南方向、高度約39.5°であった。Fig. 11は北から半時計回りで一回転させた際の出力電圧の分布である。太陽と直交する東南付近で大きな電圧値となる以外にも西北から南でも10V以上の大きな電圧

値となるセルがある。これは、光センサーが可視光帯域と同じ波長帯に反応するためであり、逆に電圧値が低下している箇所は、太陽が雲に隠れたためである。従って、この光センサーは太陽光による外乱要因が非常に大きく、屋外にて使用するためには何らかの処理が必要となることが分かった。

太陽光による外乱要因を低減する方法は、他分野にて様々な方法が採用されているが、一般的には、何らかの方法にて外乱要因をセンサーに入れない工夫が必要である。具体的には、光学的バンドパスフィルターにより外乱要因の波長帯域を低減させることなどが考えられる。そこで、本研究では620nm以下の波長をFig. 12のように遮断するシャープカットフィルター(R-62, 透過限界波長620nm)を光センサーの前に設置して外乱要因を低減させることを検討した。さらに、光センサーに太陽光が直接入射することを防ぐために、光センサーは筒内に設置して庇(ひさし)の役目をするような形状とした。なお、庇の長さについては、太陽の高度が最も低くなる冬至の午前9時頃には入射しない20°程度を想定して140mmとした。このシャープカットフィルターと庇を取り付けた状態にて、Fig. 11と同様に北から反時計回りで一回転させた。この際の実出力電圧分布はFig. 13に示すように最大でも約0.2Vの出力であり、太陽光による外乱要因は大幅に低減することが出来た。なお、最大値となった箇所には、白い建物(Fig. 10参照)があり、太陽光が反射した光を感知したものだと考えられる。それ以外の箇所では概ね0.1V程度であり、シャープカットフィルターと庇により太陽光の影響は無視することが出来ることを確認した。

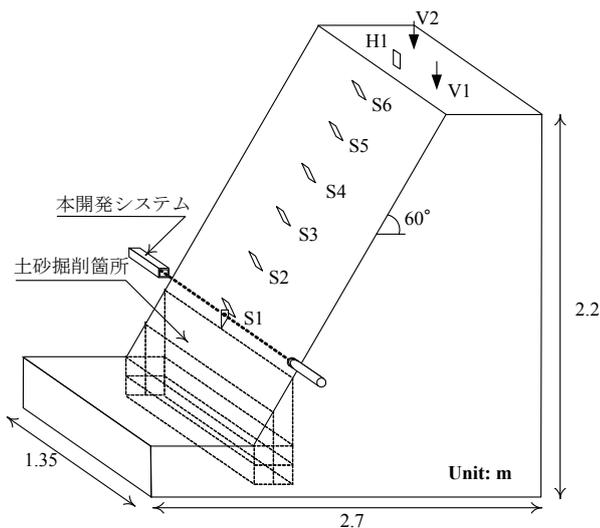


Fig. 14 Experimental setup and measurements positions.  
実験装置および計測器配置図

以上の検討結果を元に、上述で提案した2つの手法により警報システムの開発を行った。

### 3. 光センサーの発電量低下から斜面の変形を計測する方法

#### 3.1 重力場模型実験による斜面崩壊実験

(独) 労働安全衛生総合研究所内の多目的大型実験室内にFig. 14に示すような幅1.35m、奥行き2.7m、高さが前面側1.3mおよび後方側2.2mの土槽を作成し、本開発システムの性能について検証を行った。実験に使用した試料は軽く湿らせた川砂(土粒子密度 $\rho_s=2.76 \text{ g/cm}^3$ , 平均含水比 $w=8.05 \%$ , 単位体積重量 $\rho_d=1.44 \text{ g/cm}^3$ )であり、それを土槽内に投入後、締め固め、60度の斜面を作製した。実験は、段階的に法尻部を掘削することにより斜面を不安定化させ、崩壊に至るまでの変形挙動の計測を行った。

実験時の計測は、Fig. 14に示すように、斜面(法面と法肩)の変形挙動について、レーザー変位計(以下、変位計)を用いて測定した。また、本開発システムは変位計にて計測している箇所とほぼ同じ位置に設置してある(S1)。Fig. 15は実際に使用した本開発システムのレーザー光発射部、スリット部、そして受光部の拡大図を併せて示している。なお、スリット径はレーザー光を考慮して5mmとした。

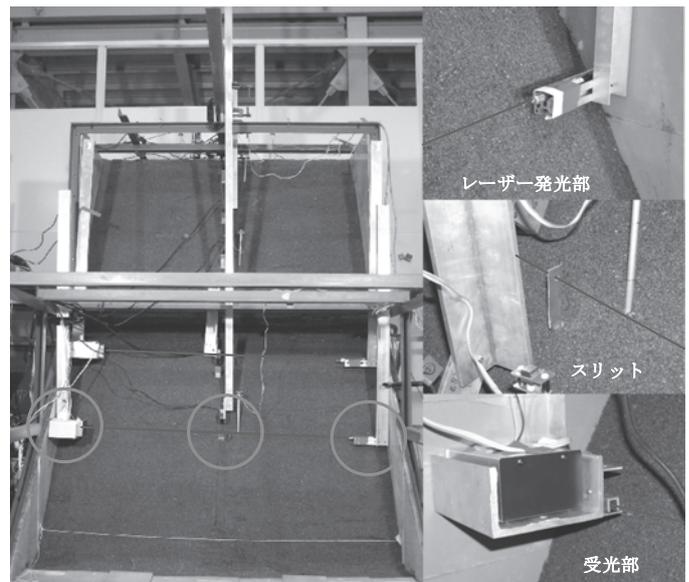


Fig. 15 View of experiment and detail of the system.  
実験斜面外観と今回使用したレーザー発光部、スリット部、受光部の拡大図

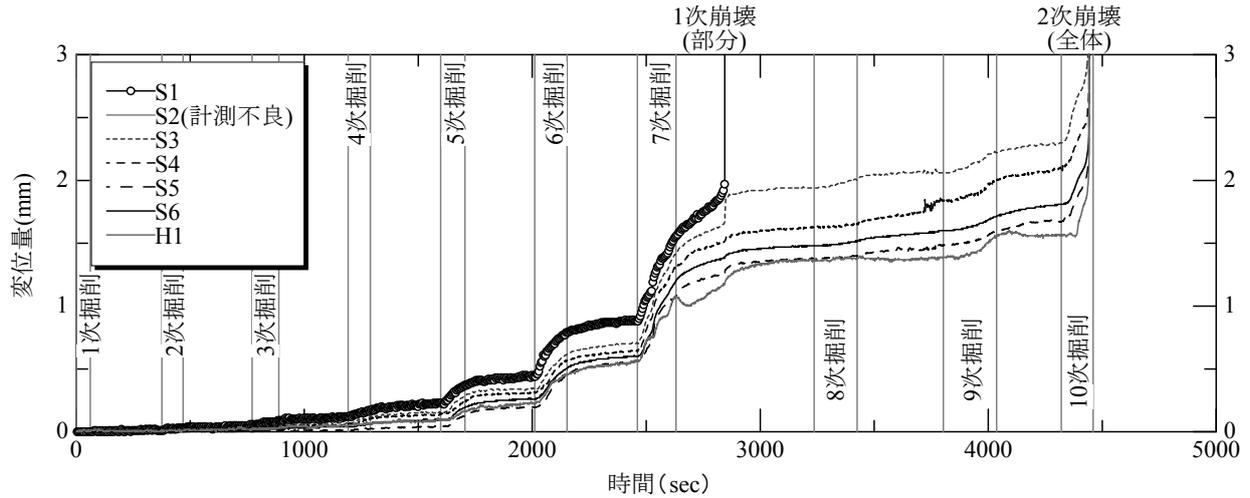


Fig. 16 Deformation for slope surface and slope top.  
レーザー変位計による経時変化

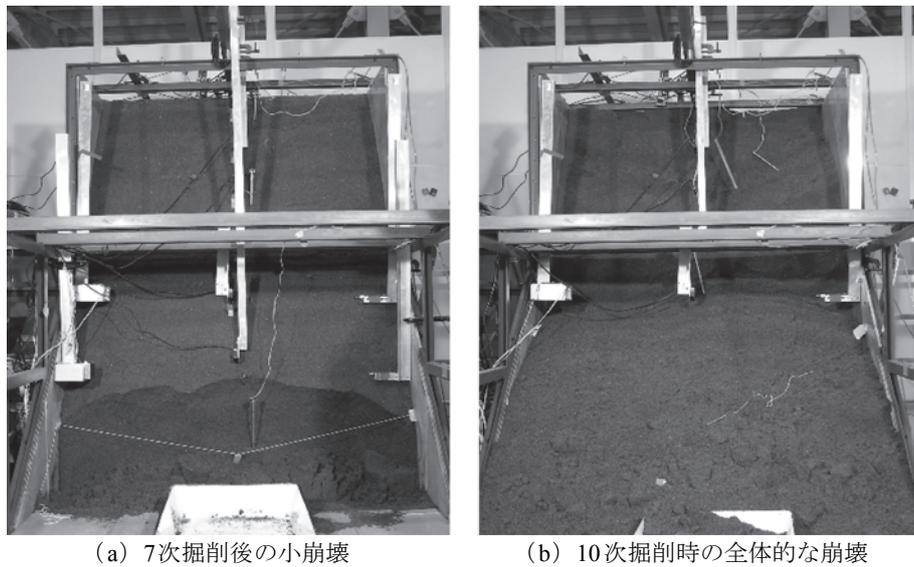


Fig. 17 Sequence of slope failure.  
崩壊形状

### 3.2 実験結果

各計測箇所のレーザー変位計から得られた変位の時刻歴をFig. 16に示す。掘削する各段階において微小ながら変位が発生している状況が確認できる。本実験事例では第7次掘削にて掘削が終了しているのにも拘わらず、変形が収束せず、掘削終了から約210秒後に、部分的な斜面崩壊に至った (Fig. 17 (a))。さらに第10次掘削中に急激な変形を計測し、全体崩壊に至った (Fig. 17 (b))。なお、本開発システムは、第7次掘削後の部分的な斜面崩壊の際にスリットごと流され計測不能となった。そこで、部分崩壊に至るまでの本開発システムの電圧低下の時刻歴をFig. 18に示す。本開発システムとレーザー変

位計S1はほぼ同じ位置に設置しており、両者の挙動はよく対応している。光センサーと同じ位置に設置された変位計S1との関係をFig. 19に示す。光センサーの発電量の低減量は、0.25mmまでは緩やかであるが、その後0.5mmまでは一定の傾きで低下している。その後0.5mm～0.75mmでは変化が大きくなっているが、これは斜面の変形によりレーザー発射部が斜面に押されたことによる (Fig. 20参照)。光センサー発電量はスリット径によってある程度の線形性を有しており、微小変形にも精度良く計測することが出来ることが分かった。しかし、この計測方法では計測範囲が小さすぎる点も問題となる。岩盤斜面など、微小変形によって崩壊に至るようなケース

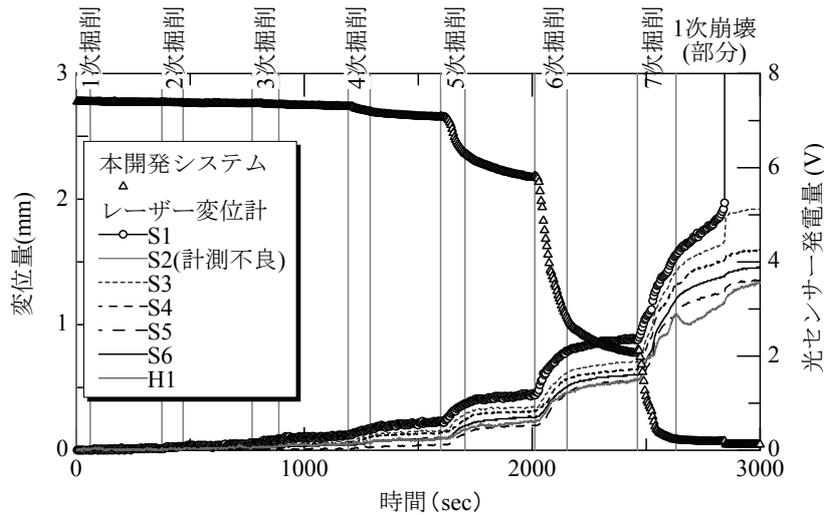


Fig. 18 Time history of output voltage of optical sensor include deformation for slope surface and top.  
変位増加による光センサーの出力電圧低下の状況

には、有効な手段だと思われる。

スリット径を排除して大変形を計測することが出来るようにセンサー素子を分割して電圧の分布形状から位置を特定することが出来れば、設置上も簡便となる。そこで、次章では同心円上に3分割した光センサー素子を試作し、変形による出力電圧と性能について検討した。

#### 4. 同心円分割型光センサー(3素子)を用いた斜面崩壊警報システムの試作

##### 4.1 強制変位によるキャリブレーション実験

室内にて光センサー受光部を強制的に変位させて、出力電圧の挙動を計測することで本システムの性能について確認した。Fig. 21に実験風景を示す。実験は、レーザー光発射部と光センサー受光部の距離とレーザー径をTable 1に示すように変化させることで、システムの感度について確認した。まず、レーザー光を光センサー受光部の中心に合わせた後、微調整ができる昇降機により光センサー受光部を上下に動かし、電圧値の変化を計測した。その後、光センサー受光部の設置位置を90度傾けて同様の作業を行った。移動量については、接触型変位計により計測した。

Fig. 22は、中心から上下方向に移動させた際の出力電圧から計算された中心位置および変位計の実測値、そしてセンサー総出力電圧を示した一例(レーザー径7mm, センサー間距離5m)である。レーザー径が光センサー受光部の内セルの径より大きくすることで中間セルも発電し、移動量を相対的な電圧差として精度良く把握することが可能となる。また、外セルはレーザー光が照射していないと考えることができ、発生した電圧はノ

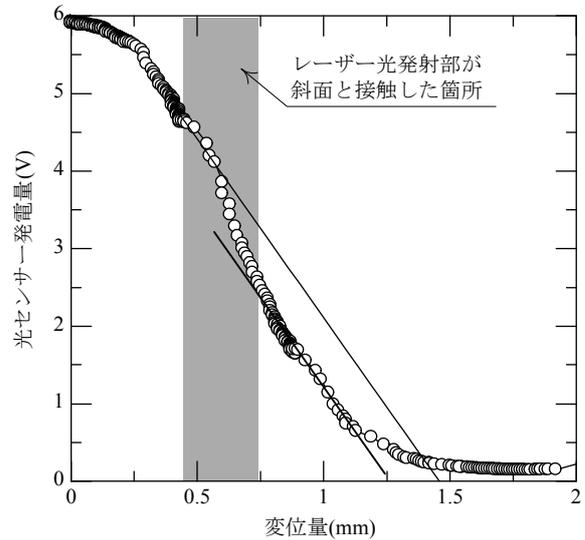


Fig. 19 Relationship between displacement and output voltage of optical sensor.  
光センサーの出力電圧と変位量の関係



Fig. 20 Pushed out the laser beam by moving slope.  
斜面に押されているレーザー光発射部

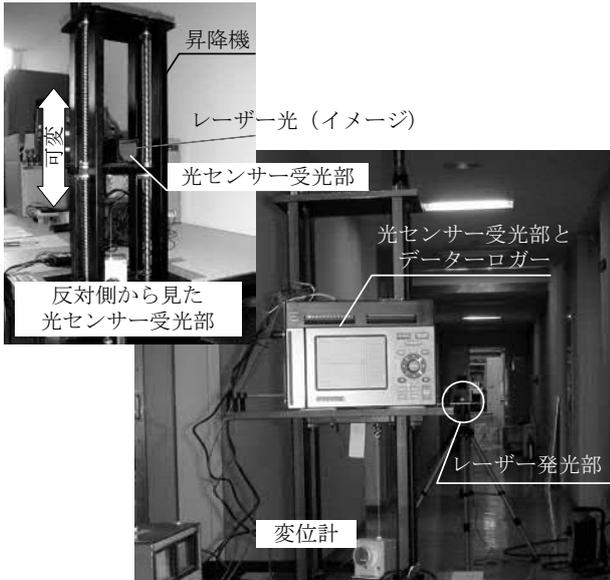


Fig. 21 Experimental View.  
キャリブレーション実験風景

Table 1 Test conditions  
実験条件

		距離 (m)			
		5.0	7.5	10.0	12.5
内径 (mm)	5	○	○	-	-
	6	○	○	○	-
	7	○	○	○	○

イズと仮定することができる。そこで、内セルと中間セルからノイズ分を差し引き、ノイズの影響を除去した。なお、レーザー光が移動し内セルに照射されなくなった場合には、中間セルと外セルのみに照射されており、内セルはノイズ計測用のセルとなる。本研究では、光センサー受光部の中心に合わせたことを初期条件として、外セルをノイズ計測用セルと固定して検討を行った。上述の条件の結果からノイズの影響を除去した内セル・中間セルの電圧値と変位の関係をFig. 23に示す。内セルと中間セルは約2.8mm地点で電圧値の大小が入れ替わる。また、内セルの電圧値と変位の関係は、多項式にて近似できる。これらのことから変位量の特定期間として、①内セルと中間セルの電圧値が等しくなる変位量、②内セルの電圧値を相対的に換算する、という二つの方法にて移動量を把握することとした。Fig. 24にレーザー径7mmにおける全ての条件の内セル・中間セルの電圧値と変位の関係を示す。これらを平滑化すると、内セルの電圧値と変位の関係は以下の6次式にて近似できる。

$$y = \sum_{n=0}^6 a_n x^n$$

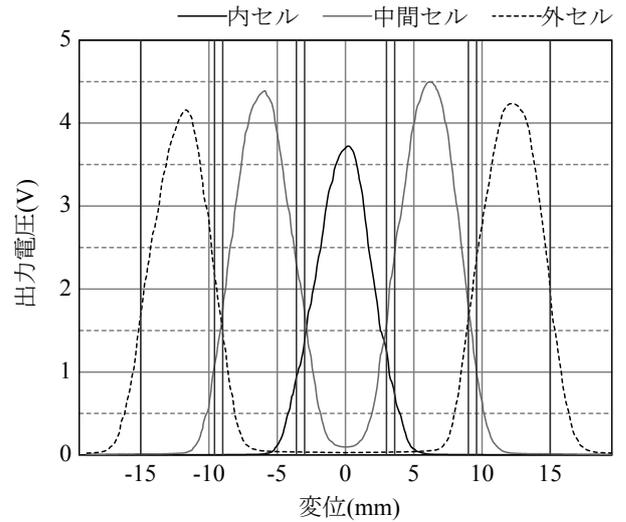


Fig. 22 Typical example of output voltage and displacement in case of laser diameter of 7mm and distance of 5m.  
出力電圧と変位の関係の一例  
(レーザー径7mm, センサー間距離5m)

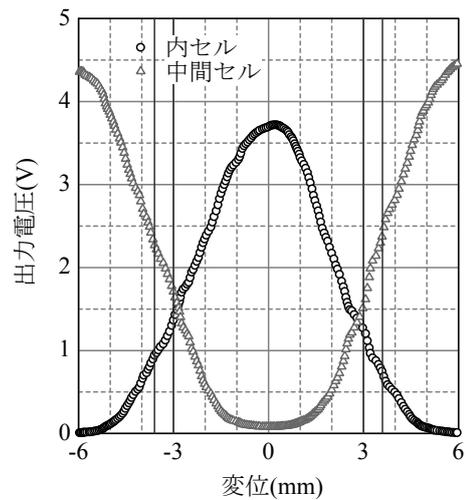


Fig. 23 Typical example of output voltage (inner and midterm cell) and displacement without noise in case of laser diameter of 7 mm and distance of 5m.  
ノイズの影響を除去した内セル・中間セルの出力電圧と変位の関係の一例  
(レーザー径7mm, センサー間距離5m)

ここで、

$$a_0 = 100, a_1 = 8 \times 10^{-9}, a_2 = 8.21, a_3 = 2 \times 10^{-10}$$

$$a_4 = 0.18, a_5 = 1 \times 10^{-13}, a_6 = 1 \times 10^{-4}$$

また、内セルと中間セルの電圧値が等しくなる変位量は、2.89mmであった。

以上の、キャリブレーション試験をもとに、実物大実

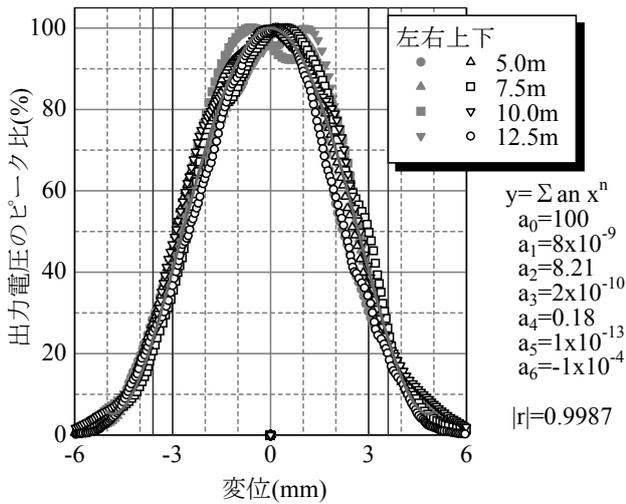


Fig. 24 Relationship between peak ratio of output voltage and displacement in the case of laser diameter of 7 mm .  
 センサー間距離が異なるレーザー径7mmにおける出力電圧のピーク比と変位の関係

Table 2 Established threshold value  
 設定した閾値

変位量 (mm)	発電量 ピーク比	砂質土	混合土	粘性土
0	100.0%			
1.00	93.8%			
1.20	90.4%			
1.40	86.4%			
1.60	82.0%			
2.00	71.9%			
2.06	70.0%			
2.44	60.0%			
2.60	54.5%			
2.89	交差			
3.00	42.4%			

==== 安全状態    ▨ 警戒状態    ■ 緊急状態

験の結果<sup>18)</sup> や既往の文献<sup>19)~21)</sup> 等から、Table 2のように地盤種類によって閾値を設定して、斜面崩壊検知・警報システムの試作を行った。

4.2 斜面崩壊検知・警報システムの試作

試作されたシステムをFig. 25に示す。光センサー受光部側は、斜面に設置する三脚、上下左右に微調整するシフター、そして受光部から構成されている。対し



Fig. 25 Trial model of monitoring and alarm system for slope failure.  
 斜面崩壊警報システムの試作機

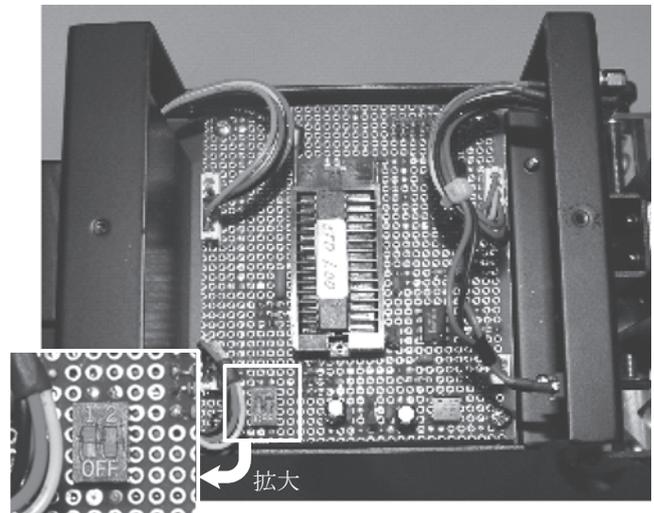


Fig. 26 A structure of printed wiring board and detail of DIP switch to change threshold value.  
 内部基板構成と閾値変更用のディップスイッチ

て、レーザー光発射部については、三脚とレーザーである。筐体はアルミニウム製で温度変化を極力抑えるように考慮されている。Fig. 26は斜面崩壊警報システム筐体内部を示したものである。内部にあるディップスイッチ (Fig. 26拡大図参照) によって、設置箇所の地盤に応じた閾値 (Table 2) での警報を発生する。今回の試作では、赤・黄・緑LEDによって警報レベルを識別するコネクターを製作した (Fig. 27) が、これに警告音を発することも当然可能である。

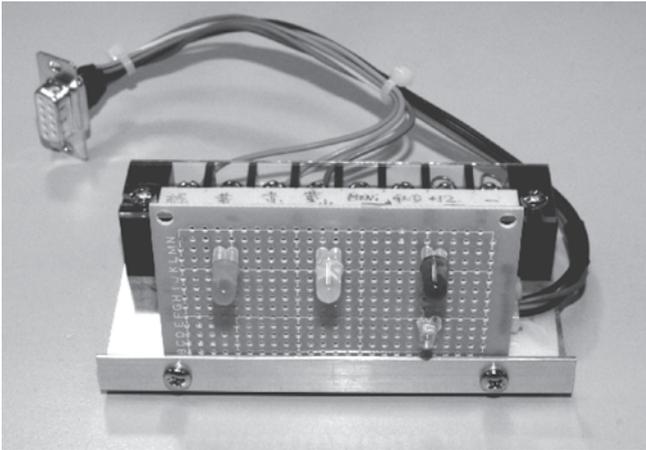


Fig. 27 Trial model of alarm beacon.  
警報発生表示機の試作

## 5. まとめ

本研究では、レーザー光と光センサーを利用した変位計測システムの開発とその適用性について検討を行った。その結果、微小変位にもある程度精度良く計測でき、実用性が十分期待できる結果が得られた。具体的な結論は、以下の通りである。

- 1) 光センサーを利用する計測システムは、太陽光の直接入射を阻止する措置を講ずることにより、変位を高精度に計測できる。
- 2) 光センサーの発電量低下から変位を計測する方法を重力場模型実験にて適用したところ、スリット径によって一定範囲に置いて線形性を有しており、微小変形にも精度良く計測できることが分かった。ただし、測定範囲は比較的狭いので、岩盤崩壊などには有効であろう。
- 3) 同心円分割型光センサーを用いて強制変位によるキャリブレーション実験を行ったところ、出力電圧と変位はレーザー径や距離に程度依存することが分かった。
- 4) これらの結果をもとに変位量を特定する簡易なロジックによる斜面崩壊警報システムを試作した。

今後、斜面モニタリングへの適用事例を増やしてデータの蓄積と閾値の検討を行いつつ、システム全体のコストダウンを図り、中小規模の工事現場でも利用される動態観測システムを構築するつもりである。また、雨、雪、霧など実地にて阻害要因となりうる要因についても、今後の検討課題である。

## 謝辞

本研究は、大成基礎設計(株)との共同研究として実施された。また、本研究を行うに当たり、関東三洋セミコンダクターズ(株)久家周二氏にアモルトンの設計に尽力して頂きました。末筆ながらここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 大西有三, 西山哲: 岩盤崩壊メカニズムについて, 地質と調査, Vol. 3, pp. 9-15, 2002.
- 2) 奥園誠之: 要注意切土のり面の管理技術について, 基礎工, Vol. 24, No. 6, pp. 36-41, 1996.
- 3) (社)地すべり対策技術協会: 地すべり観測便覧, pp. 111-164, 1996.
- 4) 大西有三, 西山哲, 矢野隆夫, 緒方健治, 松山裕幸: 精密写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究, 土木学会論文集, No. 711/III-68, pp. 187-197, 2004.
- 5) 小島謙一, 伊藤裕昌, 村田修, 秋山洋, 山浦剛俊, 棚村史郎: 土構造物の計測管理に用いる光ファイバーの基本特性, 土木学会論文集, No. 750/III-65, pp. 51-67, 2003.
- 6) 三宅克行, 田仲正弘, 玉木茂, 市川商二郎: マイクロ波を利用した岩盤斜面危険予知システムの検証, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 193-197, 2000.
- 7) 塩谷智基, 青木朋也, 藤井清司: AE斜面崩壊予測方法における基礎的研究, 土木学会論文集, No. 523/III-32, pp. 163-173, 1995.
- 8) 櫻井春輔, 清水則一, 皿海章雄, 古谷茂也: GPSによる切り取り斜面の変位測定, 土木学会誌, No. 475/VI-24, pp. 137-142, 1993.
- 9) 櫻井春輔, 清水則一: GPS(汎地球測位システム)の地盤変位計測への応用, 土と基礎, Vol. 38, No. 4, pp. 65-72, 1990.
- 10) 落合達也, 藤田浩司, 荒井健一: ノンプリズム型光波測距儀による移動変位量観測実用化への試み, 地すべり学会研究発表講演集, Vol. 37, pp. 279-280, 1998.
- 11) 千田容嗣, 浅井健一, 門間敬一: デジタルカメラ及びビデオ画像を用いた岩盤変位の簡易な測定方法, 土木技術資料, Vol. 44, No.3, pp. 46-51, 2002.
- 12) 地盤工学会切土法面の調査・設計から施工まで編集委員会: 地盤工学・実務シリーズ5 切土法面の調査・設計から施工まで, 476p, 1998.
- 13) 例えば, 建設業災害防止協会: 平成17年度版建設業

安全衛生年鑑，建設業災害防止協会，212p，2005.

- 14) 労働安全衛生広報編集部：シリーズ徹底対策⑤「土砂崩壊災害～中編～」その3 急傾斜地崩壊他作工事中，地山が崩壊し，作業員が逃げ遅れ死亡，労働安全衛生広報，企業通信社，Vol. 36, No. 848, pp. 21-22, 2004.
- 15) 伊藤和也，豊澤康男，Tamrakar S. B., 堀井宣幸：建設工事中の斜面崩壊による労働災害の調査・分析，日本地すべり学会誌，Vol. 41, No. 6, pp. 17-26, 2005.
- 16) 伊藤和也，豊澤康男，武山峰典：レーザー光と光センサーを利用した土砂崩壊検知システムの開発，第44回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 369-372, 2005.
- 17) 桑野幸徳，中野昭一：アモルファス材料の応用開発を探る 光センサへの応用，工業材料，Vol.30, No.5, pp. 39-41, 1982.
- 18) 伊藤和也，武山峰典，豊澤康男，佐野哲也：レーザーと光センサーを利用した2次元変位計測システムの開発と切土斜面の動態観測への適用，土木学会論文集C，Vol. 63, No. 2, pp.502-515, 2007.
- 19) 齊藤勉孝，上沢弘：斜面崩壊時期の予知，地すべり，Vol. 2, No. 2, pp. 7-12, 1966.
- 20) 福囿輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり，Vol. 22, No.2, pp. 8-13, 1985.
- 21) 菅原紀明：斜面崩壊・地すべり調査のポイントと計測管理，建設工事に伴う法面崩壊・地すべり対策講習会資料，土質工学会，1993.

(平成 19年 12月 10 日受理)