

## 7. 高精度傾斜計を用いた斜面崩壊の動態観測・崩壊予知システムの開発\*

豊澤康男\*\*, 伊藤和也\*\*, Tamrakar S. B.\*\*\*, 有木高明\*\*\*,  
国見敬\*\*\*\*, 西條敦志\*\*\*\*, 大久保智美\*\*\*\*

### 7. A Study on Prediction of Slope Failure Using Highly Accurate Tilt-Sensor.

by Yasuo TOYOSAWA\*\*, Kazuya ITOH\*\*, Surendra B. TAMRAKAR\*\*\*,  
Takaaki ARIKI\*\*\*, Takashi KUNIMI\*\*\*\*, Atsushi NISHIJYOH,  
and Satomi OHKUBO\*\*\*\*

**Abstract;** Sudden failures of slope during or just after slope excavation works cause many serious accidents which sometimes take the lives of workers. Loss of lives and property damages could be prevented if early predictions of failure could be made. Although many instruments have been developed to measure the movement of landslide, however, most of them are either difficult to set up or are too expensive to use at small to medium-sized slope excavation sites. In this study, a simple and cost-effective slope monitoring system using the tilt-sensor was developed, and the mechanism of slope failure was also investigated.

The tilt-sensor consists of highly sensitive accelerometers, which are made up by anodic bonding of three layers of silicon (two fixed and one movable) and glass. By measuring the output voltage, it can measure the change in the inclination of the sensor within the range of 20 degrees with the sensitivity of 100mV/deg.

Two types of prototype model of tilt sensors; small compact type and stand-alone type were used. The small compact prototype model comprises of small size accelerometers (10×8×5mm), which are mounted on a small plate (22×18mm) supported by a flat longitudinal bar. Whereas the stand-alone prototype model consists of fabricated tilt-sensors, which are rested on a thick plate (120×120mm) supported by a large diameter (48.6mm) pipe.

The small-scale full size model slopes of River sand were prepared in the laboratory and the full-scale model test of Kanto loam and Narita sand slopes were prepared in the field. The tilt-sensors were set up both on the slope surface and on the top of slope. Stepwise toe excavation was then followed at regular time interval and continuous measurement of tilt-angle was made until slope failure occurred. By analyzing the trend of tilt-angle movement (slope movement), it was found that in all cases, at each step of excavation, the changes in the tilt-angle were observed. The amount of change in the tilt-angle gradually increased during the progress of the excavation and it changed rapidly just before the slope failure. Large increment in the tilt-angle just before the slope failure showed the applicability of the tilt-sensor for the possible early prediction of slope failure during the excavation works.

**Keywords;** Tilt-sensor, Labour accident, Slope failure, Slope-cutting work, Physical modeling

---

\* 労働安全衛生研究 (Vol.1 No.2, pp.103-110, 2008) で一部発表

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

\*\*\* 前 科学技術振興事業団 重点研究支援協力員 Former Research Fellow of JST

\*\*\*\* 曙ブレーキ工業株式会社 Akebono Brake Industry Co., Ltd

## 1. はじめに

掘削工事における土砂崩壊災害によって年間20~30件前後の死亡災害が発生している<sup>1)</sup>。このうち約半数近くが斜面関連の工事中に発生している災害である。これらの工事では、工事が完了すれば安定な構造となるものの、その施工過程において十分な対策が取られずに不安定な斜面の下で作業が行われていることがある。災害の調査・分析結果<sup>2)</sup>によると、斜面崩壊による労働災害は、地山・法面掘削中に被災するケースと掘削後に切取った斜面の近くで行う作業中に被災するケースがほぼ同程度にのぼる。切取った斜面の近くで行う作業中の被災例としては、例えば、Fig. 1の概念図に示すように擁壁と地山との狭い場所で行う型枠の組立・解体作業での災害がある。当作業では斜面崩壊が発生すると逃げ場が無いために逃げ遅れて被災する事例が数多く報告されている。

このような災害の背景には、急勾配に切土掘削したために不安定化している法面付近で作業をしなければならない施工方法の欠点が指摘できる。こうした災害を防止するためには作業者が被災することのないような安全な施工方法とすることが第一義的に重要である。

安全な施工方法を策定するためには、切土掘削した斜面が安定か不安定かを工学的に判定する必要がある。しかしながら、安定な切取り斜面の高さや勾配、土留め工の設置位置・強度、長大斜面における土圧の算定法などの斜面安定問題は、現在の地盤工学・岩盤力学等の知見でもまだ完全には解明されたとは言い難い現状である。

人工的に作成される鋼やコンクリートと比べて、切土掘削工事の対象となる地盤は、地殻変動や浸食・堆積といった自然現象の履歴や、さらには盛土工事等の人工的な工事の履歴を受けてきたことが考えられ、通常地盤

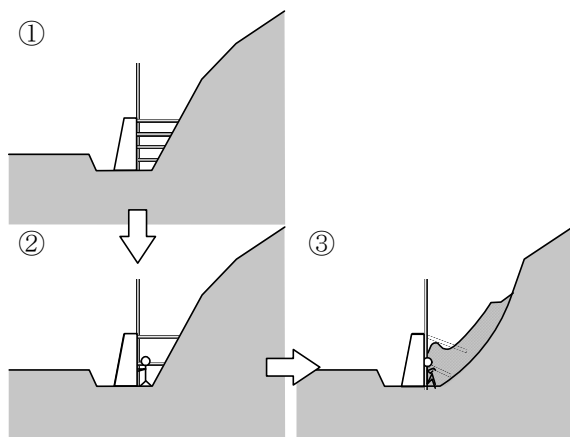


Fig. 1 Scenario of cave-in labor accident occurred between gravity wall and cutting slope.  
型枠の解体中の労働災害の概念図

調査などでは地質状態を十分には掌握しきれないこともある。こうした地盤情報の不確実性のため、地盤工学の分野では、計測や観察によって地盤の挙動を見極めながら施工することの重要性が古くから指摘されてきた<sup>3)</sup>。Terzaghi and Peckによって提唱された観測施工(Observational Procedure)は、軟弱地盤を対象として発達してきたが、設計理論・計測技術の高度化によって、動態観測や情報化施工として困難な土木・建築の大プロジェクト工事に利用されている<sup>4)</sup>。

土木・建築構造物における計測施工や常時計測を行う場合の計測機器(システム)のコストと精度の関係の概念図をFig. 2に示す。ここで、重要構造物とは、構造物が破損・損壊・倒壊すると社会的に重大な損失や甚大な被害を生じうる構造物を指す。従来の計測施工は、このような重要構造物での大規模な崩壊を対象とするものが主であり計測実績も多い。本研究で対象とする領域は、経費に余裕のない中小規模工事でも現場で採用できる程度のコストでかつ高精度の計測システムである。この領域の研究は十分とは言えない現状である。

小規模な崩壊であっても、斜面崩壊が発生する前には、地盤内部では応力が発生し、それに伴い変形が発生している。崩壊前に斜面上の小石などがパラパラと落ちてきたり、地中の植物の根が切れる音が聞こえたりするなど崩壊前に地盤が徐々に変形していることを示すものである。

このような地盤内の応力の発生や地盤変形を捉える方法としては、従来、地盤の変形を計測する方法が一般的であった。代表的な計測機器としては、不動点と斜面内

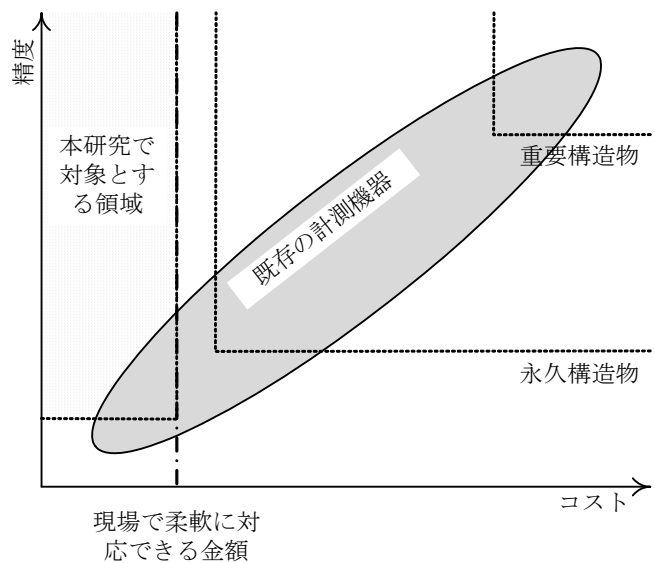
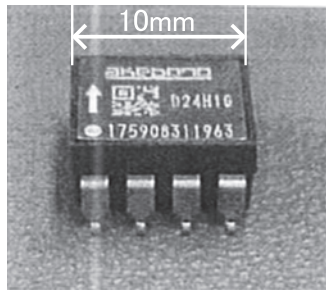
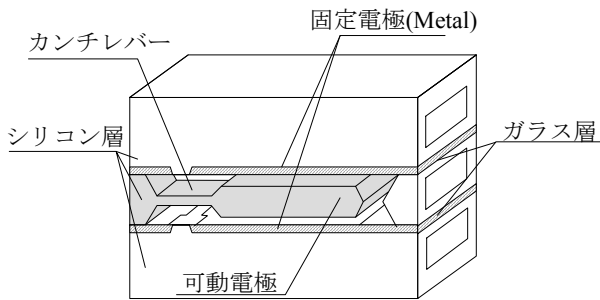


Fig. 2 Relationship between cost and performance of the observational procedure.  
土木・建築構造物における計測施工におけるコストと精度の概念図



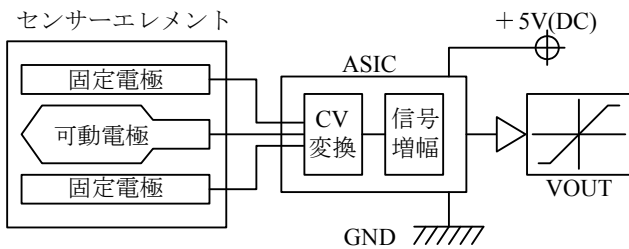
IC package.

(a) 外観 (ICパッケージタイプ)



Structure diagram.

(b) 構造図



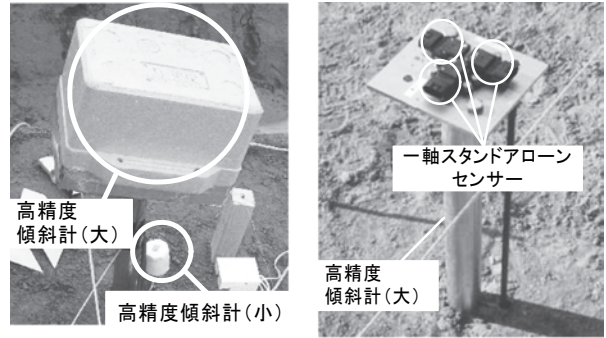
Circuit diagram.

(c) 回路図

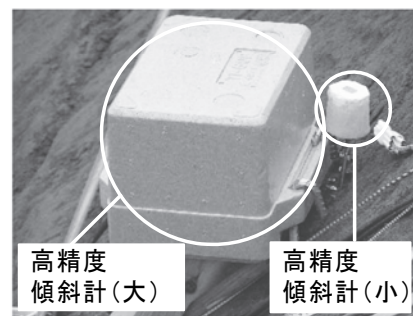
Fig. 3 Sensor element.  
(Akebono Brake Industry Co., Ltd)  
センサーエレメント (曙ブレーキ工業社製)

の点との2点間に鋼線を張り、その伸縮距離の変化を計測する「ワイヤー式伸縮計(地すべり計)」がある。この計測方法は実績も多く有効であるが、不動点ごと斜面崩壊が発生する場合は崩壊を検知出来ないおそれがあることや、崩壊規模が推定できないときは不動点と計測箇所との距離が長くなるため設置が大がかりとなるという欠点もあった。

これに対して、「高精度傾斜計」は、単体で計測可能であることに特色がある。崩壊を検知しようとする斜面内に一個計測機器を設置すれば、それだけで測定を開始できる。さらに、複数本を設置すれば面的な広がりの変形の状態を把握できる可能性がある。



(a) 法肩に設置した高精度傾斜計(左)と高精度傾斜計(大)に使用した一軸スタンドアローンセンサー(右)



(b) 斜面に設置された高精度傾斜計

Fig. 5 Tilt-sensors for field test.  
現場実験用傾斜計

このようなことから本研究では、低コストで高精度な動態観測・崩壊予知システムとして、半導体型加速度センサーを利用した高精度傾斜計に着目した。本報では、高精度傾斜計の概要と特徴を紹介するとともに室内模型斜面の崩壊実験および宅地造成地域内に築造した試験盛土での実物大斜面崩壊実験において、高精度傾斜計の斜面崩壊予知の可能性、最適な設置位置等について検討を行った結果を報告する。

## 2. 高精度傾斜計の性能・構造

### 2.1 半導体型加速度センサー<sup>6)</sup>

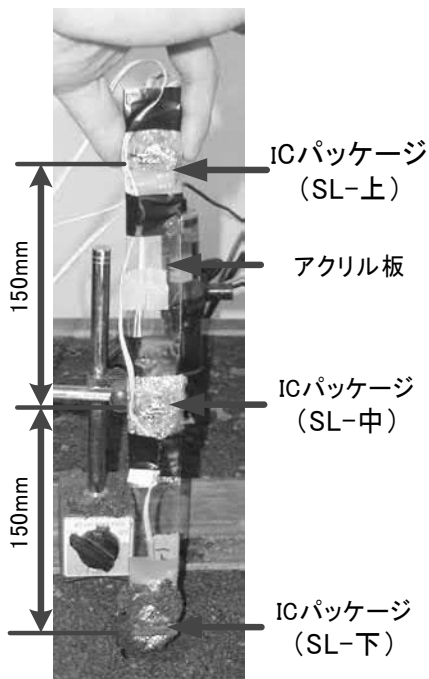
高精度傾斜計の基幹となるセンサーエレメントの外観、構造および回路をFig. 3に示す。センサーエレメントは、3層のシリコンとガラスを陽極接合したものである。傾斜することにより、中央層のフレームに取り付けられたカンチレバー可動電極と上下の固定電極部間の距離が変化し、静電容量が変化する。その静電容量を電圧に変換させてその加速度を検出するものである。加速度センサーの傾斜計としての性能をTable 1に示す。本センサーは、曙ブレーキ工業株式会社が自動車の車両制御システムとして10年以上前に開発したものであり、自

Table 1 Performance of the sensor.  
センサー性能

項目	内容
方式	静電容量式
角度計測の精度	分解能：0.01 度
測定限界角	±20 度
使用温度範囲	-20～+60 度



(a) IC パッケージタイプのセンサーエレメント2個をXY 方向に配置した高精度傾斜計



(b) IC パッケージタイプのセンサーエレメント3個を150mm間隔で配置した三連の高精度傾斜計

Fig. 4 Tilt-sensors for laboratory test.  
室内実験用傾斜計

動車内部の過酷な環境での耐久性は概ね保証されている<sup>6)</sup>。センサーエレメント自体は、大量生産されており、コストを低く抑える可能性があるといった特徴もある。また、計測システムにより温度補正を行っており高精度な傾斜角度を算出することができる。

## 2.2 高精度傾斜計の構造

室内模型実験では、Fig. 4に示すような中空アルミ棒（外径7mm，肉厚0.5mm）の上にICパッケージタイプのセンサーエレメント（10×8×5mm）をX，Y方向の傾斜が計測できるように小さな板（26×18×1mm）に取付けた高精度傾斜計を使用した。

実物大実験では、Fig. 5に示すような小型と大型の高精度傾斜計を使用した。高精度傾斜計（小：SCタイプ）は、室内模型実験で使用したものに防水加工を施したものである。これに厚さ5mm，幅20mm，長さ50mmの鉄製ピンを取付け斜面に挿入して使用した。

高精度傾斜計（大：SAタイプ）は、防水加工が既にしてある一軸スタンドアロンセンサーをX，Y方向の傾斜が計測できるように120mm角の板の上に設置したものである（Fig. 5の（a）右図）。これを直射日光による温度の影響などを受けないように発泡スチロールの箱で覆って使用した（Fig. 5の（b））。

高精度傾斜計（大：SAタイプ）の設置には、法肩では単管パイプを加工したロッド（直径48.6mm，長さ1m）（Fig. 5の（a）右図）を用いた。法面ではロッドを用いず、一軸スタンドアロンセンサーが水平となるように加工した治具を使用した（Photo 4（左））。それぞれの高精度傾斜計を、高精度傾斜計（小）をSCタイプ、高精度傾斜計（大）をSAタイプと呼ぶ。

## 3. 室内模型斜面での斜面崩壊実験

### 3.1 実験概要

（独）労働安全衛生総合研究所内の多目的大型実験室内にL字アングルとコンパネによる実験用土槽（幅1.35m，奥行き2.7m，高さ2.2m）を作成した。この土槽内部に模型斜面を作成し，その下部を掘削して斜面を不安定化させて崩壊に至る斜面崩壊実験を行い，高精度傾斜計の性能等について検証した。実験に使用した試料は川砂（単位体積重量2.76kN/m<sup>3</sup>，地盤区分SP-G，礫分（2-75mm）8.8%，砂分（0.075 - 2mm）8.8%，細粒分（75mm未満）2.1%，D<sub>50</sub>=0.453）である。地盤は川砂を層毎に突き棒により突き固めることにより作成した。

本実験は、Table 2に示すように、乾燥密度，含水比および傾斜計のロッドの埋込み深さ（高精度傾斜計の埋設深さ）を変化させた全3ケースである。掘削過程は、Fig. 6に示すように各ケースで異なっている。これは、

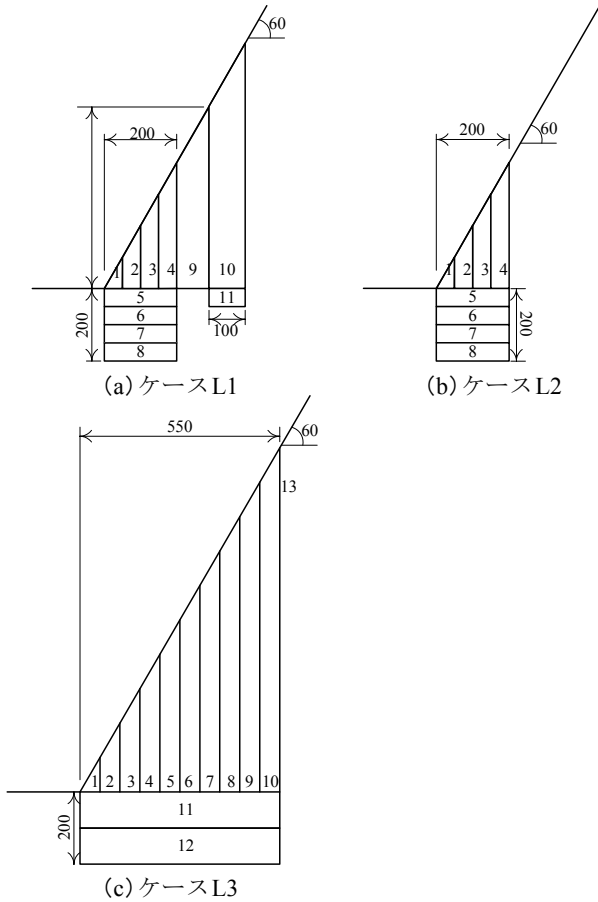


Fig. 6 Sequence of slope excavation. 掘削パターン (掘削順序)

Table 2 Test cases for laboratory test. 実験ケース

ケース	L1	L2	L3
乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.43~1.47	1.51
含水比 (%)	8.05	6.2~8.9	7.3
斜面勾配 (度)	60	60	60
ロッドの埋込み深さ (cm)	斜面	15	3 連 30
	法肩	5	3 連 30

崩壊直前の前兆を把握するために計測機器が安定するまで放置するなど、実験毎の状況に対応したためである。

計測機器の配置状況をFig. 7に示す。ケースL1、ケースL2では高精度傾斜計を斜面上に3点、法肩部に4点設置した。ケースL3では3連傾斜計 (Fig. 4 (b)) を斜面上に2点 (SL1, SL 2)、法肩部に1点 (SL3) 設置した。なお、高精度傾斜計が設置してあるほぼ同じ箇所には、レーザー変位計 (KEYENCE社製LB-01) も設置し、変位挙動を計測している。さらに、接触型変位計 (東京測器研究所社製CDP-50) を法肩部に設置し、沈下量の測定を行った。以下の計測結果に示すX方向, Y方向の出力はFig. 7に示した座標系に従って記述したものである。

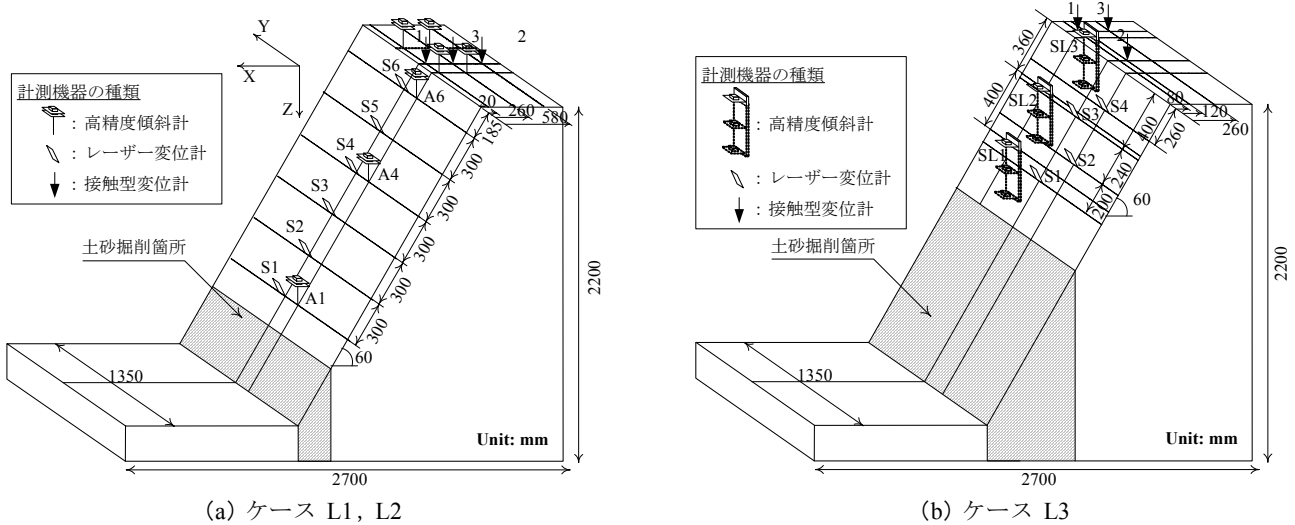


Fig. 7 Position of measurement sensors in laboratory tests. 室内模型実験における計測器配置状況

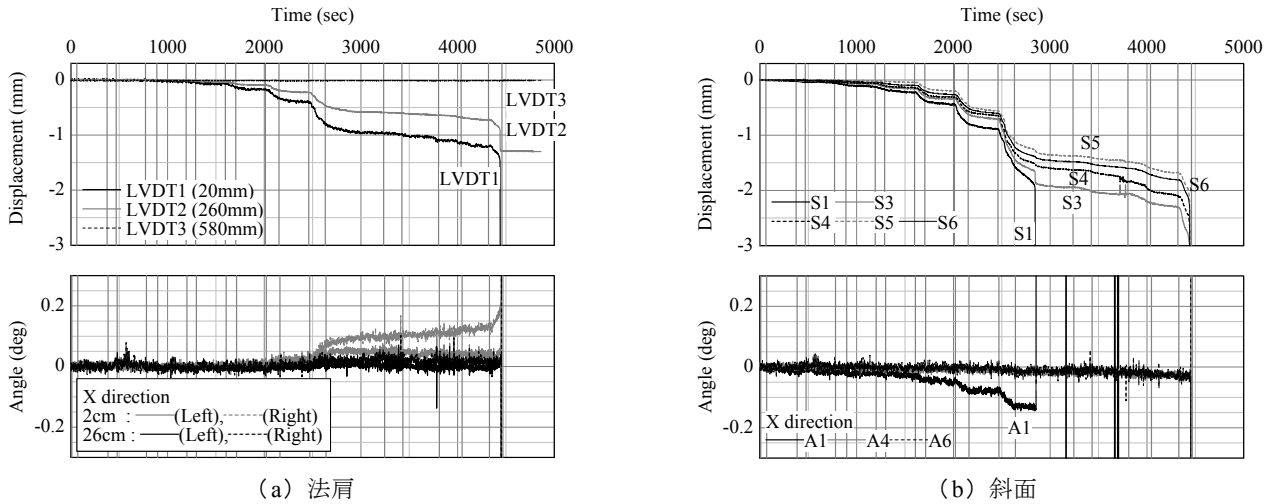


Fig. 8 Time history of displacement sensors and tilt-sensors in case L1.  
ケースL1の計測結果

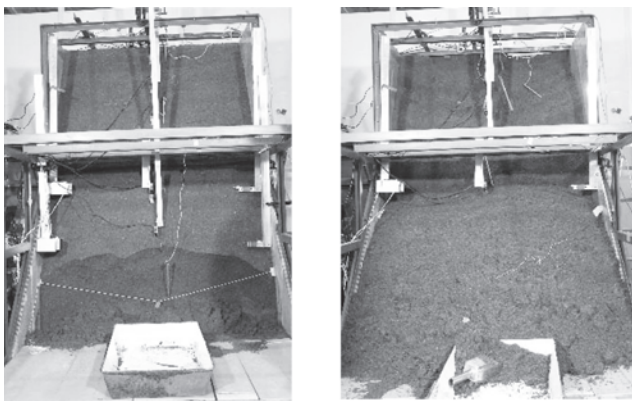


Photo 1 Sequence of slope failure in case L1.  
ケースL1の崩壊状況

### 3.2 実験結果と考察

各ケースにおける計測箇所の変位と傾斜角度について法肩と斜面での計測結果をFigs. 8~10に、崩壊状況をPhotos 1~3にそれぞれ示す。

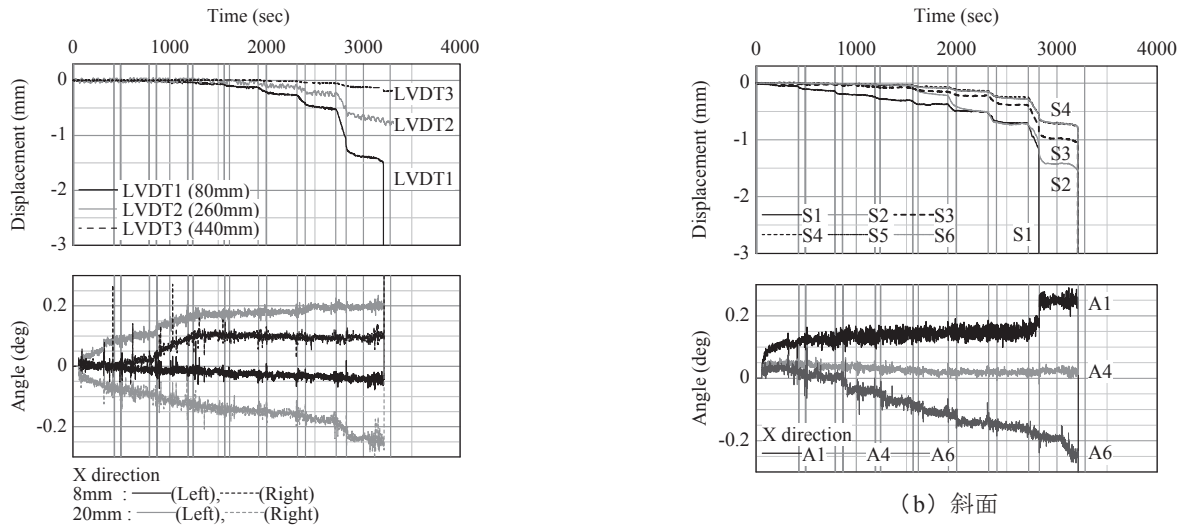
ケースL1では部分的な崩壊（斜面内崩壊）と全体的な崩壊の2回の斜面崩壊が発生した（Photo 1）。1回目の崩壊は、7次掘削にて掘削が終了しているにもかかわらず変形が収束せずに掘削終了から210秒後に斜面内崩壊（Photo 1 (a)）が発生した。その後、10次掘削中に全体的な斜面崩壊（Photo 1 (b)）が発生した。

計測結果をFig. 8に示す。変位計の結果から、掘削する各段階において微小ながら変形し、3mm程度以内の微小な変位量にて崩壊に至っていることが分かる。高精度傾斜計の結果についても、掘削に伴い0.1度オーダーの微小な変形が計測されている。特に斜面に設置された

傾斜計A1（最も掘削面に近い箇所にある高精度傾斜計）の挙動は、変位計の結果と良く対応している。傾斜計A1はX方向がマイナス側に移動していることから、斜面側に倒れるような挙動であったことが分かる。また、掘削面から離れている傾斜計A4、A6では、全体的な斜面崩壊に至る10次掘削まで緩やかな傾きで変動している。高精度傾斜計のY方向の計測結果では、その変動はほとんど見られない。これは、二次元的な崩壊を意味しており、崩壊状況とも一致する結果である。全体的な崩壊の前兆現象については、法肩部の高精度傾斜計の計測結果が明確に示している。

これらの結果から、斜面崩壊の前兆現象を的確に把握するには、計測機器を適切な位置に設置することが重要であると指摘できる。

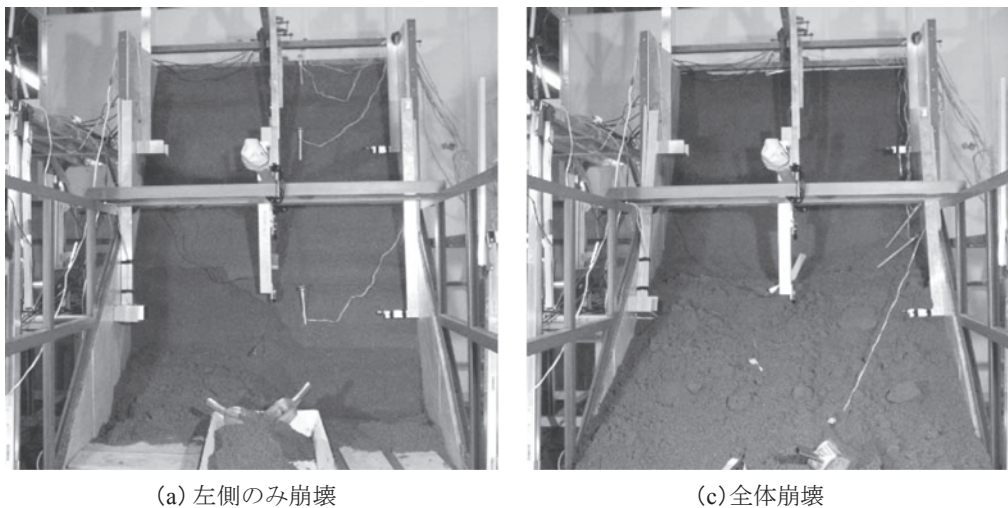
ケース2の崩壊状況をPhoto 2に示す。ケースL2でもケースL1と同様に2回の崩壊が発生した。しかしながら、1回目の崩壊は左側斜面だけの局所的な崩壊（Photo 2 (a)）であり、ケースL1の1回目の崩壊挙動とは異なる挙動を示した。計測結果をFig. 9に示す。掘削開始直後からY方向の傾きが法肩、斜面ともに現れている様子が分かる。これは、局所的に崩壊する状況を表しているものと言える。実験後に行った含水比・乾燥密度から左右で若干のバラツキが見られており、崩壊挙動にも多少なりとも影響を与えたものと思われる。斜面に設置された掘削面に最も近い傾斜計A1では、X・Y方向ともにプラス側に変動しており、崩壊した斜面左側に倒れるような挙動を示している。また、斜面上方に設置した傾斜計A6ではX・Y方向ともにマイナス側に変動しており、斜面側に倒れるような挙動と一致している。また、斜面中間に設置した傾斜計A4では、X・Y方向ともほとんど変化がなかった。ケースL1とケースL2では、掘削面近傍



(a) 法肩

(b) 斜面

Fig. 9 Time history of displacement sensors and tilt sensors in case L2.  
ケースL2の計測結果



(a) 左側のみ崩壊

(c) 全体崩壊

Photo 2 Sequence of slope failure in case L2.  
ケースL2の崩壊状況

にある傾斜計A1の挙動が全く逆の動きをしている。ケースL1では崩壊した土塊上に傾斜計が設置されていたのに対し、ケースL2では傾斜計が崩壊土塊に含まれていなかったといったことが影響しているものと推察される。

ケースL3の崩壊状況をPhoto 3に示す。ケース3では他のケースより下層が密に締まっていたことから、崩壊まで掘削量が大きくなったと考えられる。計測結果をFig. 10に示す。Fig. 10 (a) は法肩に設置した変位計(LVDT)と3連傾斜計SL3、Fig. 10 (b) はレーザー変位計による斜面表面の変位と斜面内に設置した3連傾斜計SL1とSL2の値である。掘削毎に法尻付近の下部の傾斜計(SL1-下)の値が段階的に増加し、その後、斜面中部

のSL2-下が反応した後、法肩に設置したSL3-下に大きな応答が見られた。これは、下部の掘削によって斜面内の応力分布が変化しせん断ひずみ発生箇所が変化しているものと推察される。Fig. 11は、それぞれの傾斜計の値からSL1, SL1, SL3の3連傾斜計がどのように傾いたかを模式的に示したものである。すべり面近くの傾斜計が大きく反応していることがわかる。掘削により斜面形状が変化するとともに斜面内の地盤のひずみ分布が変化することに関連していると思われる。測定箇所の選定に当たって考慮すべきである。

以上、ケースL1からケースL3の結果から、斜面崩壊に至るまでに、微少ながら斜面が変形していることが明確となった。崩壊前の法肩の沈下、斜面の変位は3mm

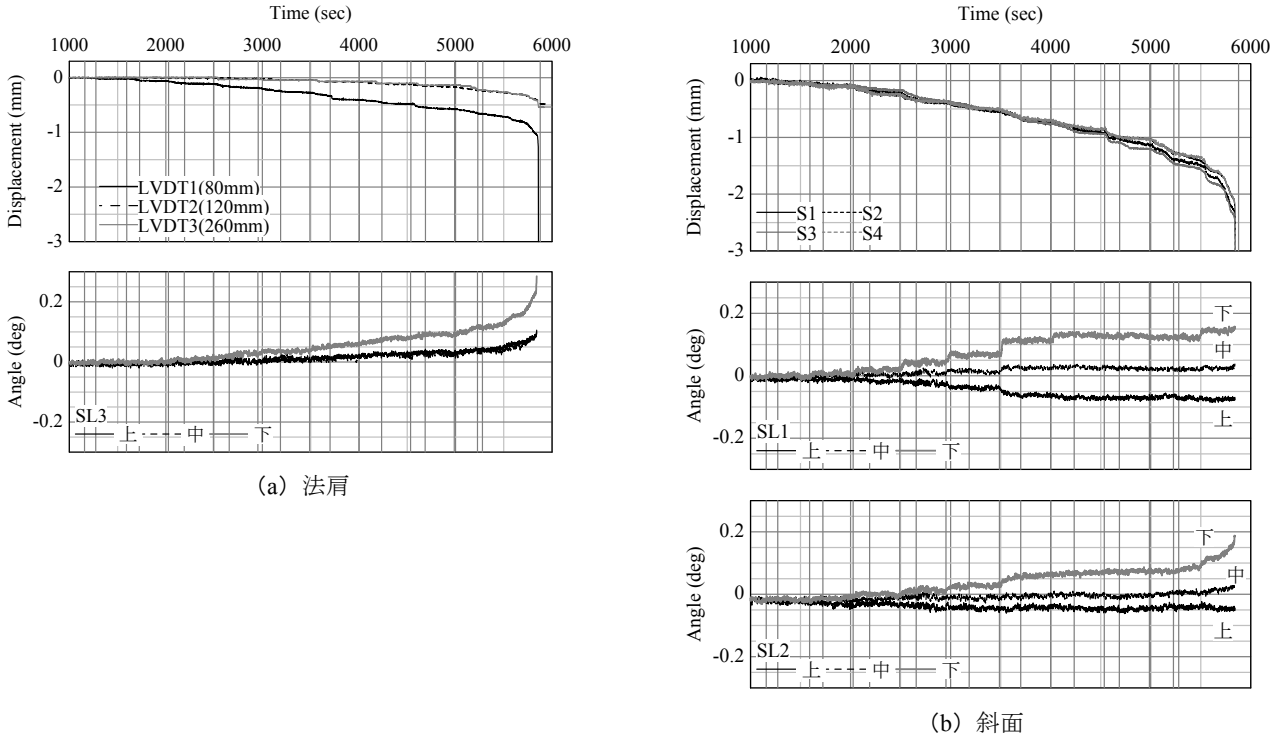


Fig. 10 Time history of displacement sensors and tilt-sensors in case L3.  
ケースL3の計測結果



Photo 3 Slope failure in case L3.  
ケースL3の崩壊状況

程度以内であったが、この変化を捉えることで崩壊の予測は可能であるといえる。また、0~0.2度程度を高精度に測定できる傾斜計は崩壊予知に有効である可能性が高いことがわかった。

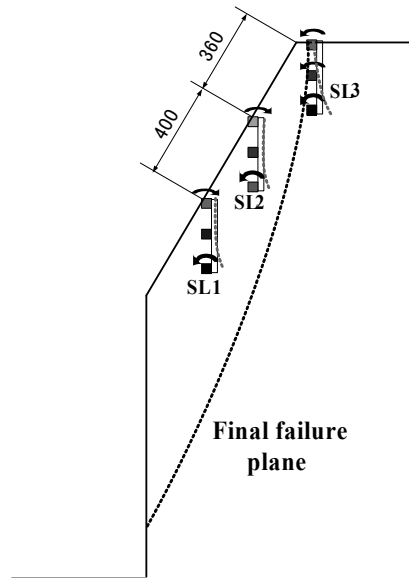


Fig. 11 Illustration of tilt sensor's inclination in case L3.  
ケースL3における三連傾斜計の傾き状況の模式図

#### 4. 切土法面掘削の実物大実験

##### 4.1 実験概要

大型宅地造成地域内において実施した実物大規模の斜面崩壊実験（以下、「実物大実験」という。）において、高



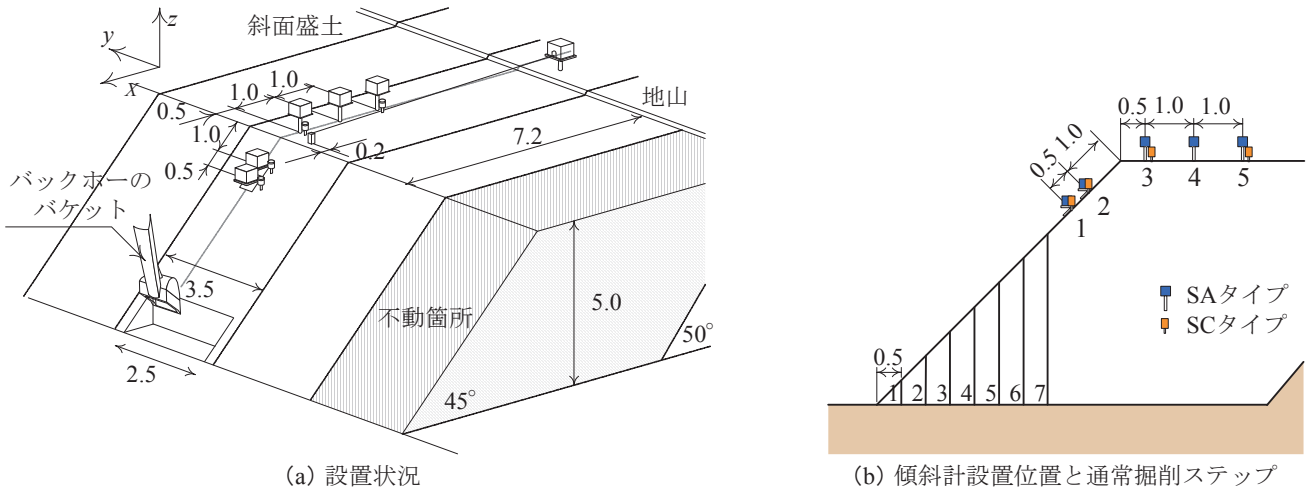


Fig. 12 Position of measurement sensors at field tests.  
実物大実験での計測器の設置状況

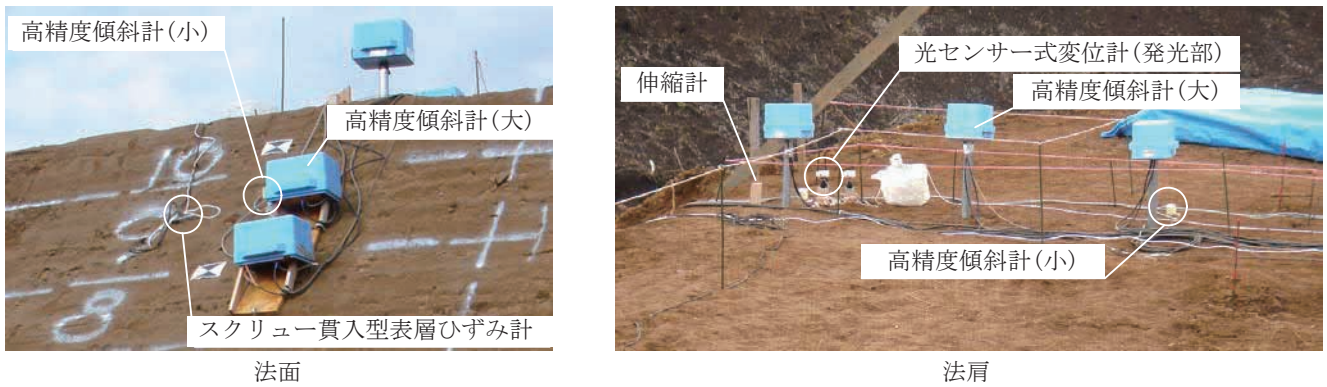


Photo 4 Measurement sensors at field tests.  
実物大実験での計測器設置状況

高精度傾斜計を設置し、斜面の変形挙動を計測した。実物大実験の施工概要や地盤物性等は文献<sup>7)</sup>に詳細に記載されている。実験ケースは、Table 3に示すように試料と密度を変化させた全4ケースである。計測機器の配置状況をFig. 12, Photo 4に示す。高精度傾斜計はSAタイプについては斜面上に2点、法肩部に3点設置した。また、SCタイプは斜面上に2点、法肩部に2点設置した。他に、法肩部の変形をワイヤー式伸縮計（以下、伸縮計）によって計測した。以下の計測結果に示すX方向、Y方向の出力は、Fig. 12に示した座標系に従っている。

#### 4.2 実験結果と考察

各ケースにおける伸縮計の変位とX・Y方向の傾斜角度の計測結果を計測器毎にFigs. 13~16に示す。また、崩壊状況をPhotos 5~8にそれぞれ示す。

高精度傾斜計の種類による計測結果の違いはほとんど無い。ただし、ケースF1の傾斜計SA1とSC1の結果では、SAタイプよりSCタイプの角度が大きい。これは、傾斜

Table 3 Test cases for field tests.  
実物大実験の実験ケース

ケース	F1	F2	F3	F4
試料	成田砂		関東ローム	
転圧回数	無し	5回	無し	5回
含水比 $w$ (%)	29.4	27.43	116.38	111.23
湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.67	1.74	1.08	1.18
乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.29	1.37	0.50	0.56

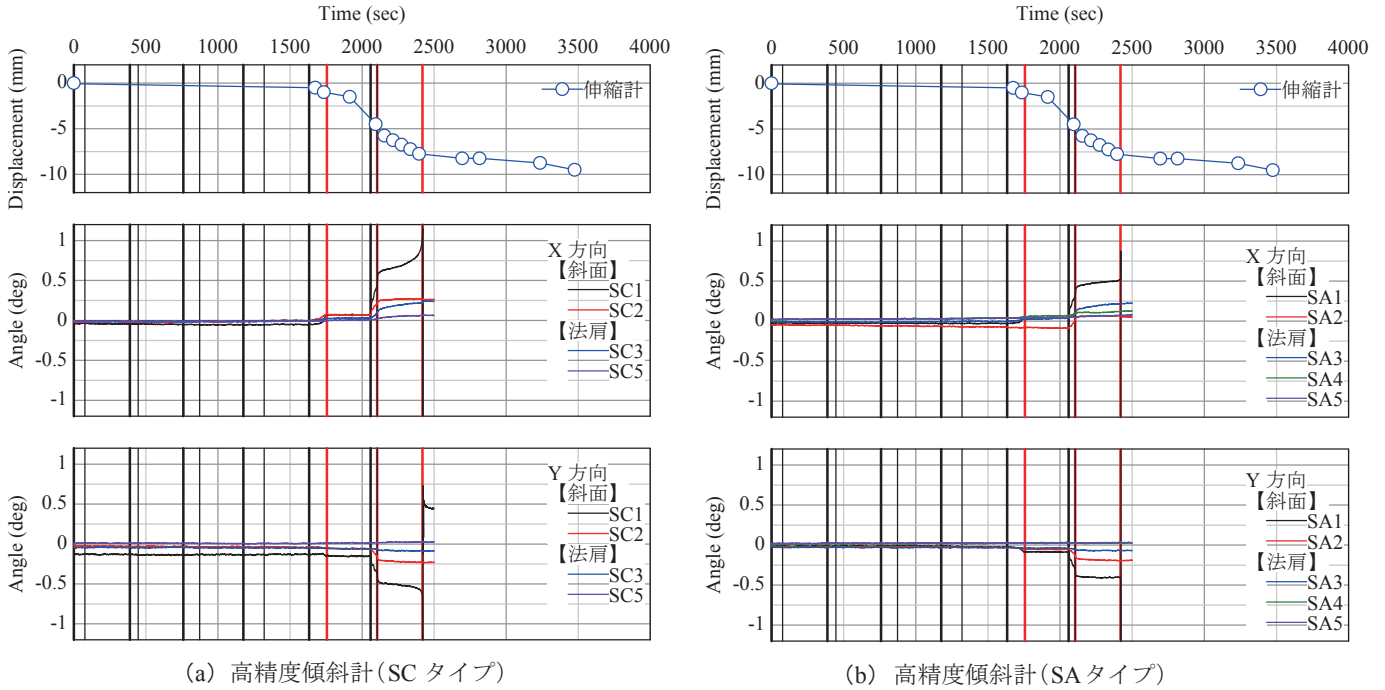


Fig. 13 Time history of wire sensor and tilt-sensors in case F1.  
 ケースF1 (成田砂・緩) の計測結果

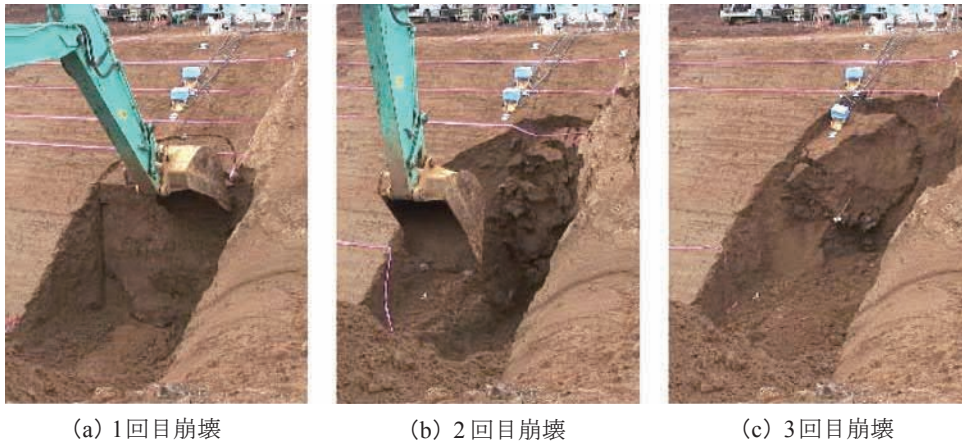
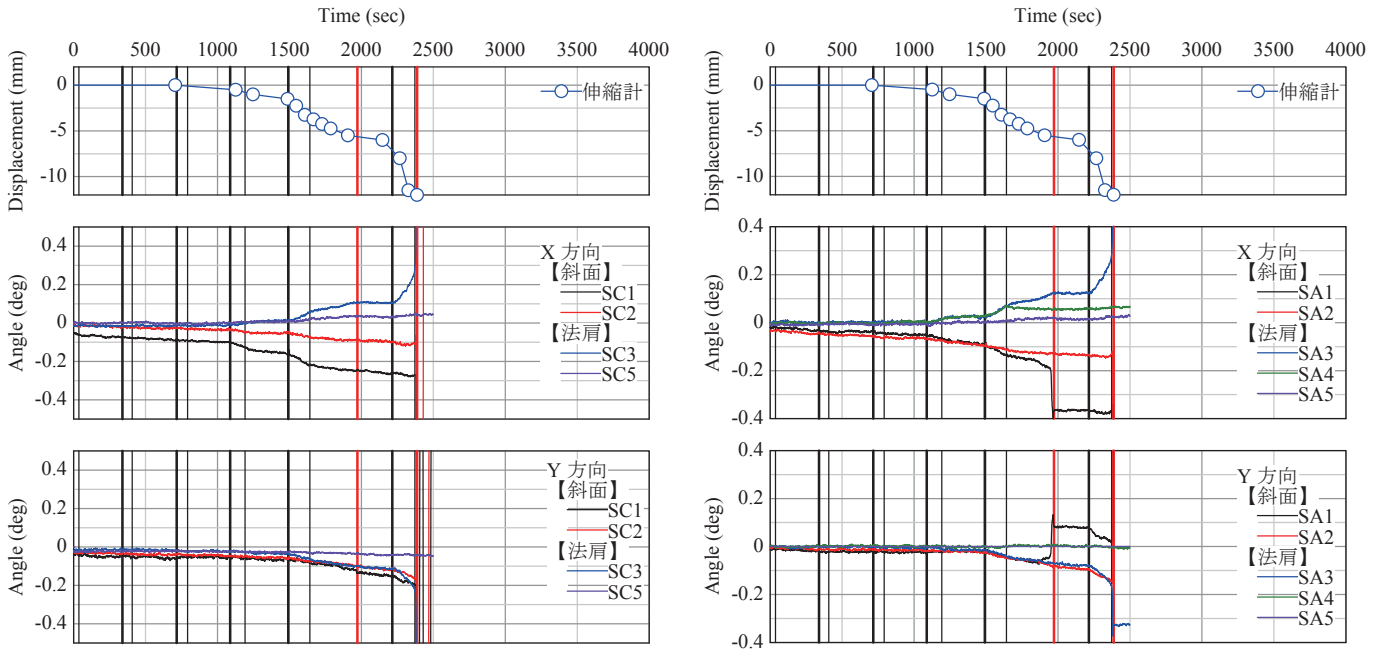


Photo 5 Sequence of slope failure in case F1.  
 ケースF1 (成田砂・緩) の崩壊状況

計を斜面に設置する方法の違いが影響していることが考えられる。すなわち、SCタイプの高精度傾斜計は、厚さ5mm、幅20mm、長さ50mmの鉄製ピンを斜面に挿入することで固定しているのに対して、SAタイプは法肩部では単管パイプ（直径48.6mm、長さ1m）を貫入することで固定したが、斜面上では単管パイプを用いず、センサーを設置した板を前面を斜面と接触させた鉄製ピン板で固定している（Photo 4（左）参照）。SCタイプの高精度傾斜計がSAタイプより若干大きな角度を示したのは、このような設置方法の差異が影響したものと思われる。

ケースF1～F2では砂質系地盤の盛土試料として成田砂を使用した。ケースF1では、全ての傾斜計においてX方向がプラス方向、Y方向がマイナス方向に変動した（Fig. 13）。X方向の変動は、傾斜計が前側に倒れこむ状況を示している。Y方向の変動は、傾斜計が斜面右側に倒れる挙動を示しており、崩壊状況と一致する（Photo 5）。

ケースF2のX方向の傾斜角度は、ケースF1とは異なり、斜面に設置した2つの傾斜計はマイナス方向、法肩上に設置した3つの傾斜計はプラス方向に変動した（Fig. 14）。1回目の崩壊（Photo 6（a））では、SA1とSA3でそ



(a) 高精度傾斜計 (SCタイプ)

(b) 高精度傾斜計 (SAタイプ)

Fig. 14 Time history of wire sensor and tilt-sensors in case F2.  
ケースF2 (成田砂・密) の計測結果



(a) 1回目崩壊

(b) 2回目崩壊 (連続的に法肩まで崩壊した)

Photo 6 Sequence of slope failure in case F2.  
ケースF2 (成田砂・密) の崩壊状況

れまでの挙動とは異なり崩壊直前に加速度的な増加傾向を示した。なお、SA1は固定していた鉄製ピンが崩壊面に含まれたため、約0.2度急激に増加した。一方、小型傾斜計 (SC) については、1回目の崩壊では加速度的に変動するような傾向は見られなかった。2回目の崩壊 (Photo 6 (b)) では、法肩に設置したSA3・SC3が加速度的な増加傾向を示して崩壊に至った。このSA3・SC3は崩壊土塊との境界近傍に設置されており、崩壊面近傍に設置することで崩壊を予測出来ることが分かる。一方、斜面上に設置した傾斜計では角度増加が見られたが、崩

壊直前の徴候は示さなかった。ケースF2のように塊で崩壊するようなタイプの地盤では、崩壊面近傍の傾斜計が崩壊直前の兆候を良く捉えていたのに対して、傾斜計を崩壊土塊上に差し込まずに設置した場合は崩壊直前の前兆現象を明確に示さないという結果となった。

次に、試料として関東ロームを使用した粘性土系地盤 (ケースF3~F4) について説明する。ケースF3の伸縮計の変位とX・Y方向の傾斜角度の計測結果をFig. 15に示す。X方向の傾斜角度は、法肩上に設置した3つの傾斜計は通常の掘削過程ではほとんど変動しなかった。ま

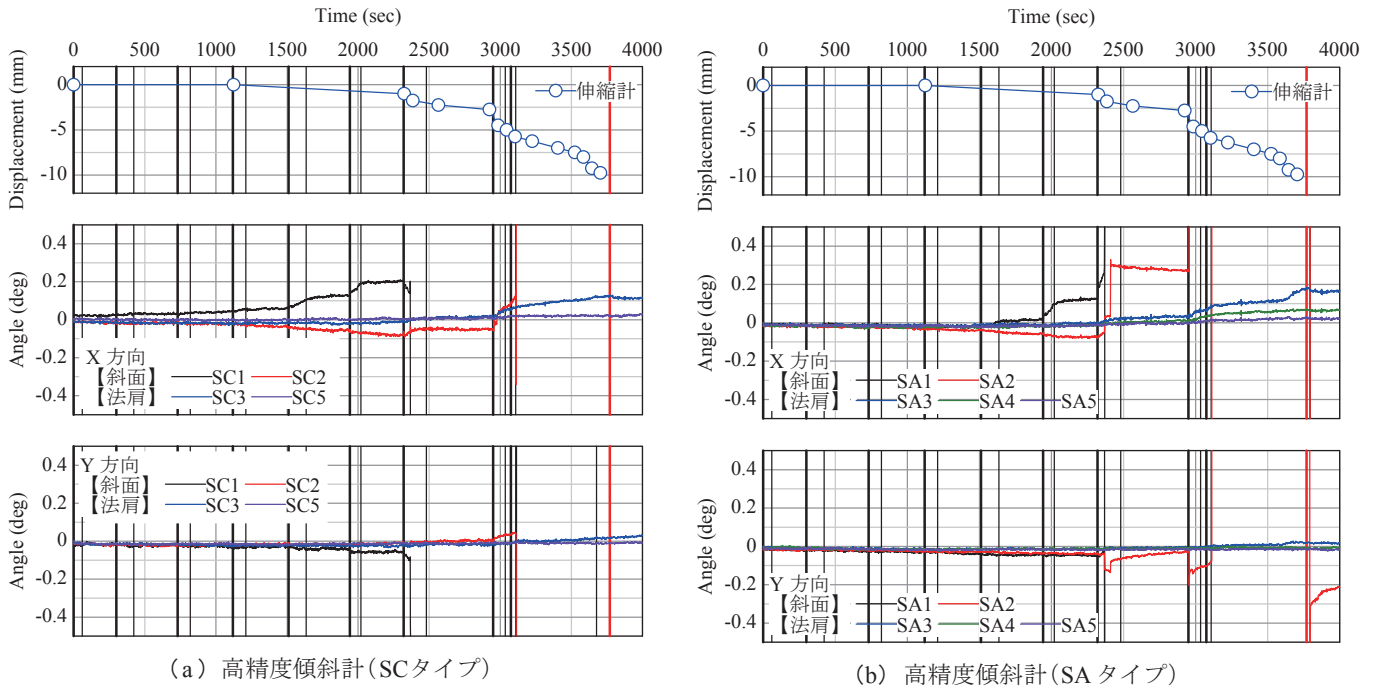


Fig. 14 Time history of wire sensor and tilt-sensors in case F3.  
 ケースF3 (関東ローム・緩) の計測結果

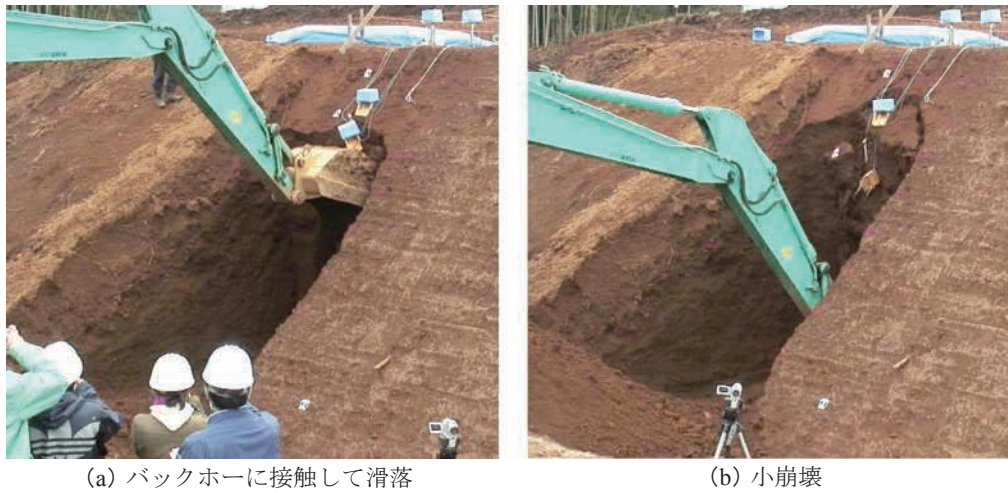
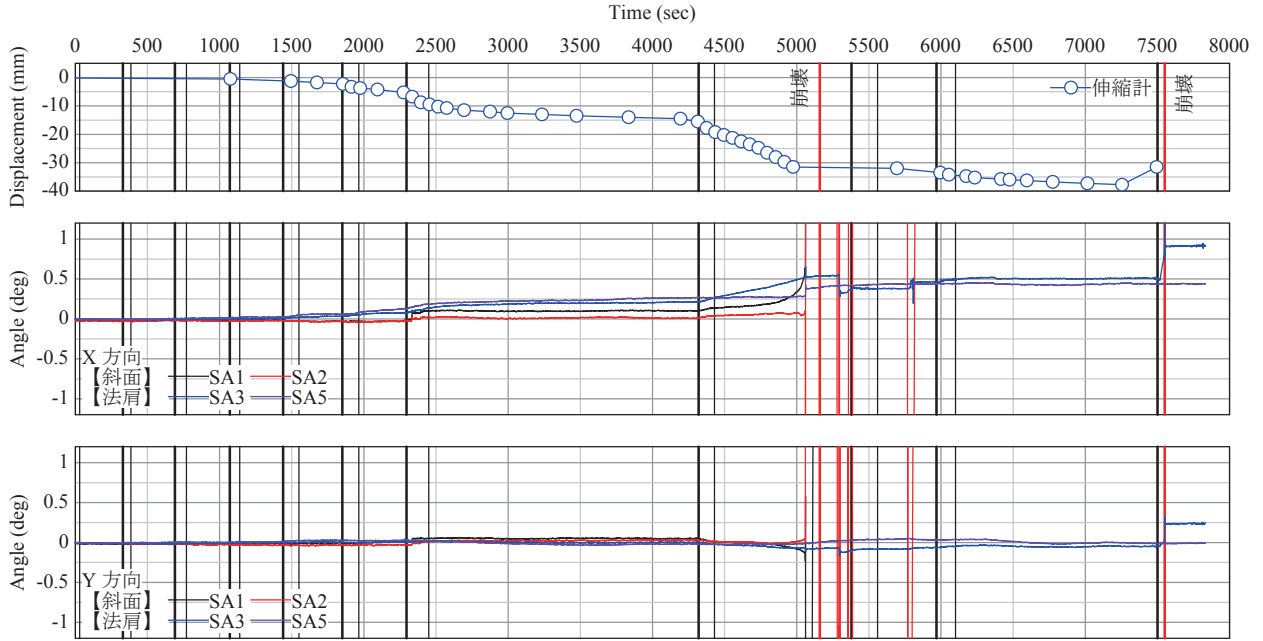


Photo 7 Sequence of slope failure in case F3.  
 ケースF3 (関東ローム・緩) の崩壊状況

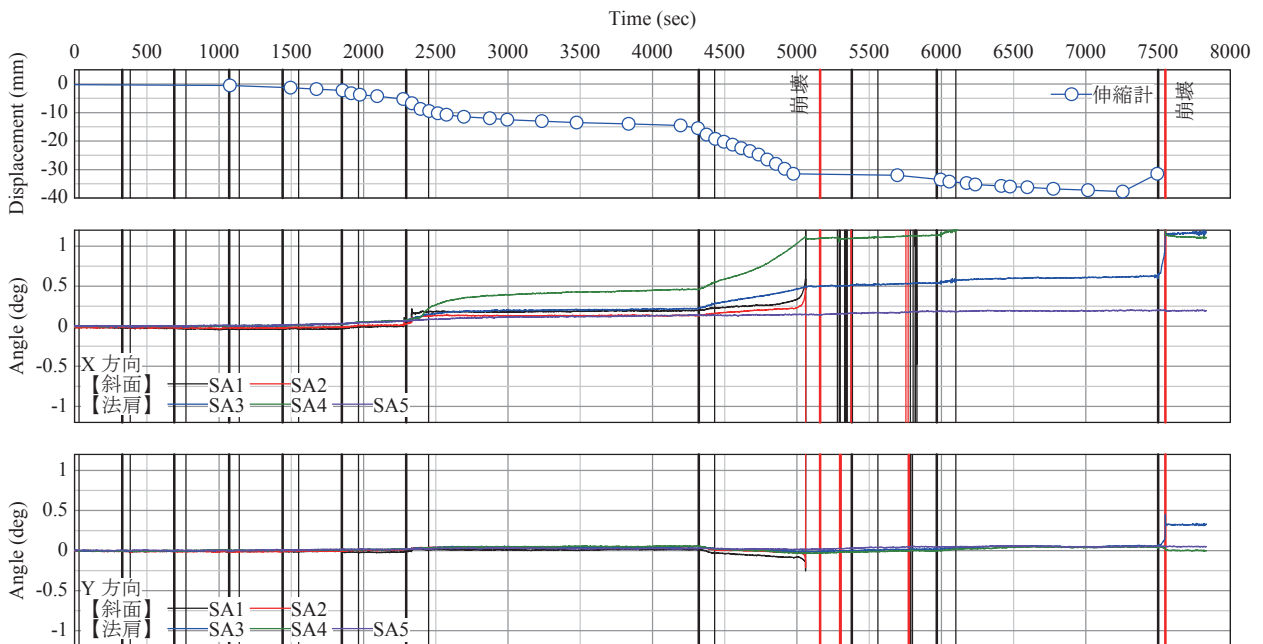
た、斜面に設置した2つの傾斜計のうちSC1・SA1は掘削途中でドラグショベル (バックホー) と接触して斜面から剥落した (Photo 7 (a))。さらに、SA2についても、SA1が剥落したことによって動いたため0.2度程度増加した。掘削下段を掘削してオーバーハング状態にする“すかし掘り”を行ったところ、最初のすかし掘りにてSC2がそれまでの挙動とは異なる加速度的な増加傾向を示し、SC2を含んだ小崩壊が発生した (Photo 7 (b))。そのまましばらく放置すると、法肩上に設置した傾斜計はプラス方向に徐々に変動し、SA3に至っては崩壊直前

に急激な増加傾向を示すようになった。

ケースF4の伸縮計の変位とX・Y方向の傾斜角度の計測結果をFig. 16に示す。掘削段階2.5m付近から伸縮計、傾斜計のX方向に変化が現れた。しかし、通常の掘削段階である3.5mまで掘削を行い、約30分間放置したが崩壊には至らなかった。そこで、掘削幅を広げることで不安定化させて崩壊させることとした。右側脇を掘削すると伸縮計の変位量と同様に傾斜計についても角度が急激に増大し、掘削面下側の土塊が剥落し (Photo 8 (a))、斜面に設置していたSA1, SA2, SC1, SC2が滑落した



(a) 高精度傾斜計 (SCタイプ)



(b) 高精度傾斜計 (SAタイプ)

Fig. 16 Time history of wire sensor and tilt-sensors in case F4.  
ケースF4 (関東ローム・密) の計測結果

(Photo 8 (b))。砂質系地盤の場合には、塊で崩壊するタイプでは傾斜計を崩壊土塊上に設置すると崩壊直前の前兆現象を把握しづらかったが、粘性土地盤については、崩壊した土塊上に設置していた傾斜計から崩壊の前兆現象を捉えることが出来ており、地盤種類の違いによって設置位置を検討しなければならないことを示している。ケースF4では、Y方向もマイナス側に変動した。これは、右側脇を掘削したことにより傾斜計の設置されている位

置が中心からずれたことが起因していると思われる。

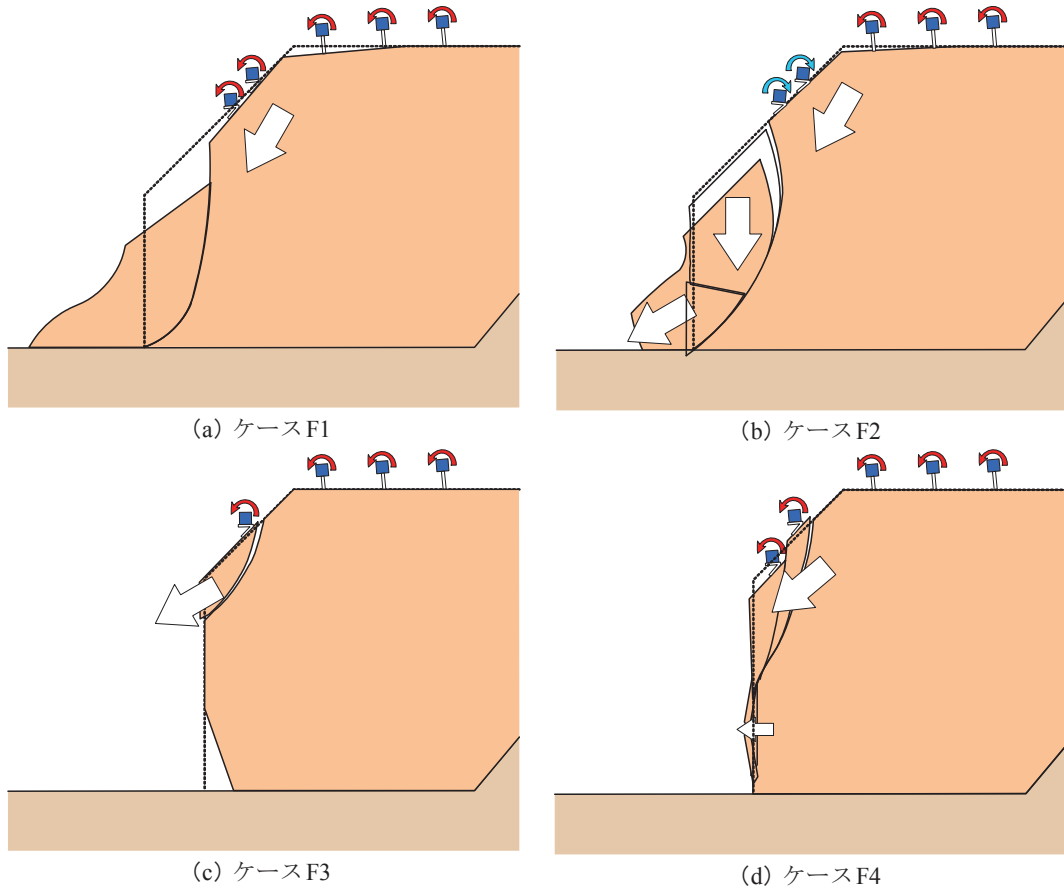
実物大実験における高精度傾斜計の変動傾向と崩壊状況から、それぞれの崩壊メカニズムを推定すると、Fig. 17のようになる。ケースF1は、掘削の進行に伴って斜面全体が前側に倒れるような挙動を示した。ケースF1はブルドーザーによる転圧を行っていないため、地盤自体がほとんど塊化しておらず、土砂がパラパラと流れ落ちるような崩壊となった。一方、ケースF2では掘削の



(a) 掘削面下側の剥離

(b) 崩壊

Photo 8 Sequence of slope failure in case F4.  
ケースF4 (関東ローム・密) の崩壊状況



(a) ケースF1

(b) ケースF2

(c) ケースF3

(d) ケースF4

Fig. 17 Failure mechanism estimated by measurement results.  
計測結果から想定される崩壊メカニズム

進行に伴い掘削面下部に応力が集中し、掘削面下部がクサビ部分剥落するように崩壊し、それにより上部にあった土塊が落ちるような崩壊形状となった。これは、掘削斜面の形状により法尻部に応力が集中することによる影響が大きい。試料として関東ロームを使用したケース

F3では試料として成田砂を使用したケースF1, F2のように全体的な崩壊とはならず、表層の局所的な崩壊となった。関東ロームは粘性土的な挙動を示すことから、粘着力の影響により崩壊箇所が局所的になったものと推定される。また、締め固められたケースF4では、掘削

面下側が剥離するような崩壊が起きた後にある程度の土塊が崩壊するような挙動を示した。これらの変動は傾斜計の結果と一致する。

## 5. 計測機器の活用について

### 5.1 安全施工における計測機器の位置付け

斜面崩壊による労働災害を防止するには、計画の段階から設計・施工まで全体を通して包括的な見直しを行い、全施工工程を安全な状態とすることが必要である。そのためには、①作業員が危険な状況とならないような安全な施工方法を採用することが必要である。その際には、②切り取り斜面下で行う各種作業の見直し、③施工途上の斜面安定性の検討（土留めなど抗土圧構造物の設置を含む）が不可欠である。さらには、長大斜面などで、どこから崩壊が発生するか予測がつかない場合を始めとして、地盤・抗土圧構造物の不確定要素が残存する場合など、上記対策を補完するものとして、④計測施工が重要と考えられる。

すなわち、計測施工は、切土掘削工事を安全とするために重要であるが、計測施工さえやっていたら他は何もしなくてもいいというものではなく「安全施工」とするための補完的な位置付けとなると考える。

### 5.2 判断基準について

上述したように崩壊前の地盤変位、傾斜角変化は、室内模型実験では3mm程度、0.2度程度であった。現場実験では崩壊前までに0～30mm程度の変位、0～1.0度程度の傾斜角度の変化があった。このような微小な変化を捉えるには目視による監視だけでは到底不可能である。計測機器による客観的なデータに基づく判断が必要であると言える。

次に、得られた値をどう判断するかという閾値（判断基準）の問題がある。地盤の種類やその現場の地層状態に崩壊メカニズムは大きく影響される。崩壊メカニズムによって閾値（判断基準）も変わってくると考えられることから一律に確定的な値を示すことは難しい。しかしながら、安定している地盤は動かないことから、当然のことではあるが、計測値に変化が現れたら注意して計測値の時間経過を追うことが必要である。その際には本実験で得られたデータも一つの参考値となるものと思われる。計測値の変化が止まらない場合や変化の度合い（微分値）が変わる場合は要注意である。その場合は、施工方法の再検討などが必要であり、発注者との協議も必要となる。急激な変化が現れた場合は、崩壊直前のおそれがあるので緊急に避難すべきである。

また、当該実験から、すべり面付近など変化が現れやすい場所があり、計測機器の設置位置で感度が異なること

がわかった。崩壊の前兆を確実に捉えるためには崩壊の可能性のあるところを網羅するように計器を配置することが重要である。

## 6. まとめ

本研究では、低コストで高精度な動態観測システムとして半導体型加速度センサーを利用した高精度傾斜計を斜面崩壊の動態観測・崩壊予知へ適用することの可能性について検討を行った。その結果、労働災害が発生しやすい小規模な崩壊においても、精度良く計測ができ、崩壊直前の前兆現象を捉えることが出来ることを確認した。具体的な結論は、以下のとおりである。

- 1) 川砂で作成した高さ2.2mの模型斜面において、法尻掘削によって崩壊に至るまでの地盤変位、傾斜角を計測した結果、崩壊前に地盤変位が生じるとともに傾斜角が変化していることが明らかとなった。当該実験では0～3mm程度の変位、0～0.2度程度を高精度に測定できる変位計、傾斜計は崩壊の予知に有効であるといえる。
- 2) 斜面の法尻掘削とともに斜面表面、内部各点の傾斜計の反応も変化している傾向が見られた。掘削による斜面形状の変化に伴い、斜面内における地盤のひずみ分布の変化と関連している。傾斜計は、すべり面となる可能性のある近辺の地盤内に埋設することにより高感度の予測が可能になることが分かった。計測機器の差込みロッドの挿入量を深くするなど、測定箇所を選定・設置に当たって考慮すべきである。ただし、崩壊の前兆現象を表すような加速度的な角度の増加については、設置位置に大きく依存した。
- 3) 高精度傾斜計は単体で計測可能であり、単に地盤に差し込めばいいことから、設置に関して専門技術が不要という特徴がある。また、センサー一個が比較的廉価であることから、多数の設置が容易であり、崩壊部を確実に捉えるために崩壊による災害の可能性のある箇所に面的な広がりを持った配置が可能である。高精度傾斜計のメリットを生かした配置を考慮する必要がある。
- 4) 現場における高さ5mの実物大斜面崩壊実験（砂質系地盤（成田砂）と粘性土系地盤（関東ローム））において、法尻掘削によって崩壊に至るまでの地盤変位、傾斜角を計測した結果、崩壊前に地盤変位が生じるとともに傾斜角が変化していることが明らかとなった。当該現場実験では崩壊前までに0～30mm程度の変位、0～1.0度程度の傾斜角度の変化を観測した。室内模型実験と同様に法尻に設置した傾斜計で崩壊前に角度の急激な増加傾向が観測され、崩壊の前兆

現象を捉えることが出来た。

- 5) 砂質系地盤の密実な斜面において、崩壊部が塊となって崩壊するような場合は傾斜計を崩壊土塊上に設置しても崩壊直前の前兆現象は捉えられなかった。粘性土地盤では、砂質系地盤とは異なり、崩壊する土塊上に設置された傾斜計で崩壊直前に急激な角度の増加が見られ、崩壊直前の前兆現象を捉えることが出来た。すべり面付近など変化が現れ易い場所があり、計測機器の設置位置で感度が異なることがわかった。崩壊の前兆を確実に捉えるためには崩壊の可能性のあるところを網羅するように計器を配置することが重要である。また、地盤の種類の違い等によって設置位置を検討することも必要である。

本研究での成果は、2種類の砂質系地盤（川砂、成田砂）と1種類の粘性土系地盤（関東ローム）において実施した盛土斜面崩壊実験結果から得られたものである。今後、様々な地盤種別の斜面にてモニタリング等を実施し、データの蓄積と閾値の検討を行い、中小規模の建設工事現場にて利用される動態観測システムを構築するつもりである。

## 謝辞

本研究の一部（室内模型実験）は、厚生労働省科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業 課題番号H17-労働一般-016、代表研究者：三田地利之）の補助を得て実施したものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Terzaghi, K. and Peck, R. B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willy & Sons, Inc., 1969.
- 4) 切土法面の調査・設計から施工まで編集委員会編：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.
- 5) 地盤技術者のための情報化設計・施工入門編集委員会編：入門シリーズ26 地盤技術者のための情報化設計・施工入門，162p，2000.
- 6) 国見敬，納谷六郎，堀井直彦：車両運動制御用高性能加速度センサの開発，自動車技術，Vol.55, No.10,

pp. 48-53, 2001.

- 7) 伊藤和也，豊澤康男，Tamrakar S. B.，Timpong S.，堀井宣幸：切土掘削工事中における斜面崩壊メカニズムに関する検討，労働安全衛生総合研究所特別研究報告，JNIOSSH-SRR-NO.35 (2007)，投稿中.

(平成19年3月6日受理)