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†

豊澤 康 男*¹ 伊 藤 和 也*¹ TAMRAKAR S. B.*² 三田地 利 之*²
国 見 敬*³ 西 條 敦 志*³ 大久保 智 美*³

建設工事中の斜面崩壊による労働災害は、中小規模工事での被災がほとんどを占めている。これらの背景には、中小規模工事に対応した労働災害防止技術の開発の立ち遅れや、経費に余裕のない中小規模工事においても利用可能な簡易で廉価な計測・警報装置が十分に整備されていないことがある。そのため本研究では、経費に余裕のない中小規模工事にも利用可能なより廉価な計測システムの製作を目的として、半導体加速度センサーを利用した高精度傾斜計の開発および試作を行った。本報では、高精度傾斜計の概要を紹介するとともに、高さ 2.2m の室内斜面模型の崩壊実験に基づき、高精度傾斜計による斜面崩壊直前予知の可能性および最適な設置位置等について検証を行った結果を報告する。

キーワード: 斜面崩壊, 傾斜計, 崩壊予測, 労働災害, 模型実験

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 30 件前後の死亡災害が発生している¹⁾。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²⁾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数程度にのぼる。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、図 1 の概念図に示すように擁壁と地山の間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、現在の地盤工学・岩盤力学等の知見をもってしても斜面安定問題はまだ完全には解明されたとは言えない現状である。

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、通常的地盤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。

図 1 型枠の解体中の労働災害の概念図

図 2 土木・建築構造物における計測施工でのコストと精度の概念図

† 原稿受理 2008 年 3 月 25 日

*¹ 労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ

*² 北海道大学

*³ 曙ブレーキ工業株式会社

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ 豊澤康男*¹

E-mail: toyoawa@s.jniosh.go.jp

Terzaghi and Peck によって提唱された観測施工 (Observational Procedure)³⁾は、軟弱地盤を対象として発達してきたが、最近では、設計理論・計測技術の高度化によって、土木・建築の大プロジェクト工事において動態観測や情報化施工として利用されている^{4,5)}。

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図 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ことが考えられる。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も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「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。

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に着目した。本報では、はじめに高精度傾斜計の概要と特徴を紹介するとともに高さ 2.2m の室内模型斜面の崩壊実験において高精度傾斜計の斜面崩壊直前予測の可能性および最適な設置位置について検証を行った結果を報告する。

2 高精度傾斜計の性能・構造

1) 半導体型加速度センサー⁶⁾

高精度傾斜計の基幹となるセンサーエレメントの外観、構造図および回路図を図 3 に示す。本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。センサーエレメントが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

(a) 外観 (IC パッケージタイプ)

(b) 構造図

(c) 回路図

図 3 センサーエレメント (曙ブレーキ工業株式会社製)

表 1 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

写真 1 IC パッケージタイプの X・Y 傾斜計

ものである。加速度センサーの傾斜計としての性能を表 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⁶⁾。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兼ね備えている。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。

写真2 IC パッケージ三連の傾斜計

写真3 実験用土槽

2) 高精度傾斜計の構造

室内模型実験の際には、写真1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をX、Y方向の傾斜が計測できるように取付けたものを用いた。さらに、斜面内部の変化を捉えるため、厚さ1.0mmのアクリル板に3個の傾斜計（センサーエレメント）を150mmずつ離して取り付けた3連の傾斜計を作成し（写真2参照、以下、3連傾斜計）、地盤内に挿入にして計測を行った。なお、3連傾斜計については、計測器の都合上、X方向の傾斜のみ測定することとした。

上述のような高精度傾斜計を室内模型実験に用いて、斜面崩壊の前兆現象等の確認を行った。

写真4 地盤作成の様子

表2 実験ケース

ケース		1	2	3
乾燥密度 (g/cm³)		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	15	3 連 30
	法肩	5	5	3 連 30

(a) ケース 1

(b) ケース 2

(c) ケース 3

図4 掘削パターン

図 5 計測器配置状況

図 6 ケース 1 の計測結果

(a) 部分的な崩壊 (7 次掘削)

(b) 全体的な崩壊 (10 次掘削)

写真 5 ケース 1 の崩壊状況

図7 ケース2の計測結果

写真6 ケース2の崩壊状況

3 室内模型斜面での斜面崩壊実験

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写真3に示すような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^3 , 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%, $D_{50}=0.453$)である。地盤は川砂を写真4のように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, 表2に示すように, 乾燥密度, 含水比, 傾斜計のロッドの埋込み深さおよび高精度傾斜計の埋設深さを变化させた全3ケ

ースである。掘削過程は, 図4に示すように各ケースで異なっている。これは, 崩壊直前の前兆を把握するために計測値が安定するまで放置するなど, 実験によって臨機応変に対応したことなどによる。

計測機器の配置状況を図5に示す。ケース1, ケース2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3では3連傾斜計を斜面上に2点(SL1, SL2), 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方向の出力は図5に示した座標系に従って記述したものである。

図8 ケース3の計測結果

写真7 ケース3の崩壊状況

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図6～8に、崩壊状況を写真5～7にそれぞれ示す。

ケース1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（写真5）。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（写真5(a)）が発生した。その後、10次掘削中に全体的な斜面崩壊（写真5(b)）が発生した。計測結果を図6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を呈していたことが分かる。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、2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の崩壊状況を写真6に示す。ケース2でもケース1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（写真6(a)）であり、ケース1の1回目の崩壊挙動とは異なる挙動を示した。計測結果を図7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

図9 ケース3の三連傾斜計の傾き状況の模式図

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1とケース2では、掘削面近傍にある傾斜計 A1 の挙動が全く逆の動きをしている。ケース1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2では傾斜計が崩壊土塊に含まれていなかったということが影響しているものと推察される。

ケース3の崩壊状況を写真7に示す。ケース3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。計測結果を図8に示す。図8(a)は法肩に設置した変位計(LVDT)と3連傾斜計SL3、図8(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)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。図9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と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1からケース3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。

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て配置するなど、高精度傾斜計の特徴を生かした配置を考慮することができる。

なお、小規模で急角度の砂地盤において崩壊予知が出来たことから、崩壊までに変形がより大きい粘性土でも崩壊前の変位を捉えることが可能と考えられる。

4 計測機器の活用について

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れば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。

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。

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、当該実験では3mm程度、0.2度程度であった。このような微少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、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。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。

5 おわりに

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・崩壊予知への適用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。
- 2) 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。
- 3) 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。

- 4) 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、測定箇所の選定・設置に当たって考慮すべきである。

謝 辞

本研究の一部は、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る。

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; 2005 : 212p.
- 2) 伊藤和也, 豊澤康男, Tamrakar SB, 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. 2005 ; 418(6) : 17-26.
- 3) Terzaghi K, Peck RB. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & 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. 1998 : 476p.
- 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. 2000 : 162p.
- 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. 2001 ; 55(10) : 48-53.

Prediction of Slope Failure Using Highly Accurate Tilt Sensors

by

Yasuo TOYOSAWA^{*1}, Kazuya ITOH^{*1}, Surendra B. TAMRAKAR^{*2} Toshiyuki MITACHI^{*2}
Takashi KUNIMI^{*3}, Atsushi NISHIJYOH^{*3} and Satomi OHKUBO^{*3}

This paper presents the application of tilt sensors to measure the movements of a slope surface and slope crest just before failure during excavation of the lower parts of the slope. The tilt sensors used here consisted of highly sensitive and accurate accelerometers, which could measure tilt angles along the XY directions. Full-scale model slopes were prepared using river sand in the laboratory; the slopes were excavated from the lower parts (toe excavations) until slope failure occurred. A gradual increment in tilt angle during the excavation and rapid increment just before slope failure were observed by the tilt sensors, verifying the applicability and efficiency of using tilt sensors to predict slope movement in actual excavation sites.

Key Words: slope failure, tilt sensor, failure prediction, labor accident, physical modeling.

^{*1} Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Hokkaido University

^{*3} Akebono Brake Industry Co., Ltd