

掘削途中の斜面における表面移動速度の逆数を用いた斜面崩壊予測手法について

南出 奏^{1*}・ピパットポンサー ティラポン¹・北岡 貴文¹・大津 宏康¹

¹京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8246 京都府京都市西京区京都大学桂)

*E-mail:minamide.kana.43u@st.kyoto-u.ac.jp

露天掘り鉱山で用いられる法尻掘削手法においては、掘削過程で生じる斜面崩壊が問題となり、崩壊時間の予測が課題となっている。斜面崩壊の予測手法としては、ひずみや速度、加速度、斜面の回転角等の経過を観測する方法が挙げられている。福圓ら(1985)の提唱する予測手法においては、観測対象は斜面移動速度の逆数の時間変化である。本研究では過去に行った法尻掘削斜面の模型実験において得た観測結果から斜面移動速度の逆数値を求めることにより、斜面の崩壊時刻の予測を試みた。結果的には、本研究での予測手法の妥当性が明らかになった一方で、斜面の観測については使用機器や解像度の詳細等への言及が必要であることが示された。

Key Words : arching effect, excavation, pile, inverse velocity, slope failure estimate method

1. 背景

鉱山の掘削に見られるような大規模な斜面掘削の現場では、掘削途中での斜面崩壊による事故が問題となっている。タイ北部の露天掘り鉱山であるメモ鉱山では、このような掘削中の事故を防止するための対策が考えられている。メモ鉱山の掘削を行っているタイ電力公社 EGAT では、掘削による斜面移動を把握するために現場にレーダー観測機(写真-1)を設置して斜面の移動距離を測定し、掘削中の斜面をモニタリングしている。

Pipatpongsa²⁾らはアーチ型崩壊を引き起こす斜面崩壊のメカニズムについて言及している。アーチ効果とは、粒子同士がアーチ型に連なることで力が伝達され、支持力が発生する現象のことであるが、斜面を形成する土粒子についても斜面崩壊時に力の伝達が起こるというメカニズムが示されている。

斜面崩壊の対策としては、斜面の補強や斜面崩壊の予測が考えられる。抑止杭による斜面の補強については過去の模型実験³⁾において検証した。そのため、本研究では斜面崩壊の予測手法に焦点を当てている。比較的容易な方法で斜面をモニタリングするためには、斜面のひずみや回転角、速度といった値を対象とすることが可能である。福圓⁴⁾は、降雨による斜面崩壊において表面移動速度が斜面崩壊の発生時刻の予測に用いることができると述べている。また、斉藤⁵⁾によると斜面崩壊の予測因子としては斜面の変位やひずみ、ひずみ速度が有効であ



写真-1 斜面レーダー観測機
(2016/9/5 Mae Moh鉱山)

ることが分かっている。本研究では、福圓³⁾の提唱する、斜面表面の移動速度の逆数による斜面崩壊予測手法に従い、過去の実験³⁾の結果を用いて斜面崩壊の予測やモニタリング手法について検討する。

2. 模型実験の概要

過去に行った法尻掘削斜面の模型実験²⁾では補強効果の大きい抑止杭の配置について検討した。模型実験の供試体は珪砂6号(表-1)を含水比10%に調節しており、砂を締め固めて斜面幅130cm、斜面高さ80cm、斜面厚さ6cm、法尻部分の長さ40cm、傾斜40度の斜面を作成した(写真-2)。すべり面にはテフロンシートを敷いており、底部と

表-1 硅砂6号の物性値

単位体積重量 [kN/m ³]	13.68
一軸圧縮強さ [kPa]	2.1
粘着力 [kPa]	0.1
内部摩擦角 [degree]	18.5



写真-2 模型実験の供試体



写真-3 斜面崩壊が生じた供試体(アーチ型崩壊)

砂斜面の摩擦を軽減している。斜面法尻部分の中心から掘削すると、斜面強度が限界に達した時に斜面崩壊が生じる(写真-3)。掘削速度は厳密には定義していないが、斜面法尻の中心線から左右2.5cmずつを1回として、1回あたり約5分で掘削した。斜面には様々な配列で杭(鉛筆芯、直径2mm)を設置しており、杭の配列により異なる斜面崩壊パターンが見られた。斜面崩壊の様子は天井付近に固定された高速度カメラにより撮影しており、撮影動画を使用して画像分析を行い、斜面移動速度を観測した。

3. 模型実験の結果

本研究では上記の模型実験の結果から、異なる3種類の崩壊パターンが見られた実験を挙げ、斜面移動速度の検証を行うこととする。本実験で見られた崩壊パターンには、次のようなものがあった。



写真-4 非対称アーチ型崩壊



写真-5 全体崩壊

- 対称なアーチ型崩壊(写真-3)
- 非対称なアーチ型崩壊(写真-4)
- 全体崩壊(写真-5)

対称アーチ型崩壊(a)は、法尻の掘削幅と同規模のアーチ型の崩壊が生じた場合を指す。また、非対称アーチ型(b)については、挿入した杭の本数が比較的多い斜面に見られた。これは、模型の締固め段階で斜面左右に不均一が生じたことが要因のひとつであると考えられているが、杭の補強効果により広範囲の掘削が進み、掘削幅と同規模のアーチを形成する前に斜面に亀裂が生じてしまったためであると推察される。一方で、アーチ型に崩壊せず、斜面全体が滑り落ちるような崩壊が見られたものを全体崩壊(c)としている。全体崩壊では、斜面下部に座屈が生じており、座屈により側壁周辺での支持力が十分に働かなかったと考えられる。以上に挙げた崩壊型の違いによって表面移動速度に差が出るのかという点は、本研究における検証項目のひとつである。

4. 観測方法について

(1) モニタリング原理

速度や変位を対象としたモニタリングにおいては、初期段階に設定した点を追跡するラグランジュ法と、固定した観測領域内で測定するオイラー法がある。ラグランジュ法の場合は、伊藤ら⁹⁾による実地観測のように、数



写真-6 想定されるアーチ面と観測領域

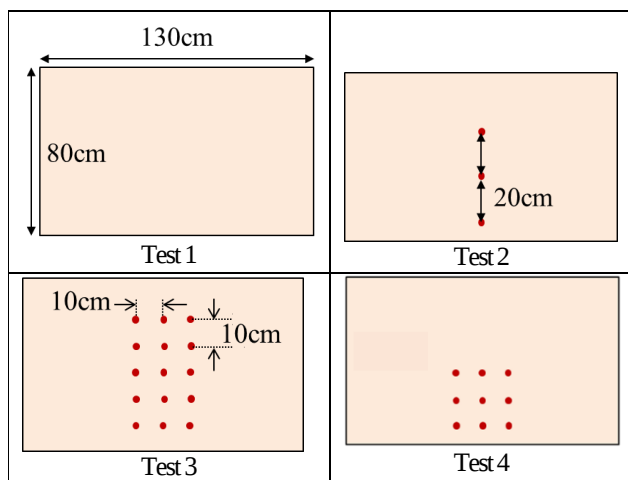


図-1 速度検証に使用する実験例

箇所の定めた点に計器を設置して動きを観測することで、その点の正確な動向が測定できるが、定めた点ごとに計器の設置や調整が必要となる。一方で、施工途中の斜面において、計器を取り付けるのが困難な場合や崩壊可能性のある範囲が広い場合にはオイラー法が適していると考えられる。本研究ではオイラー法に基づき、固定カメラを用いて指定した領域内の斜面の表面移動速度を観測する。ここで使用した速度分析ソフト(Flow Expert, カトウ光研製)での計算過程では、斜面のモニタリング対象領域をメッシュ分割し、画像の濃淡パターンから変位が導出されるという原理である。

(2) 観測領域

本研究は斜面崩壊の予測という観点で斜面観測を行っている。そのため、速度の観測領域については斜面移動が予測される範囲を予め想定して設定した。斜面法面付近に領域を設けた場合は、掘削中の小崩壊や作業による影等が映り、速度測定に誤差を生む原因となり得る。そこで、速度の測定結果から観測領域の取り方をいくつか検討し、法尻掘削幅に応じてアーチ型崩壊が生じると考えられる部分を決定した(写真-6, 点線が予想アーチ面、

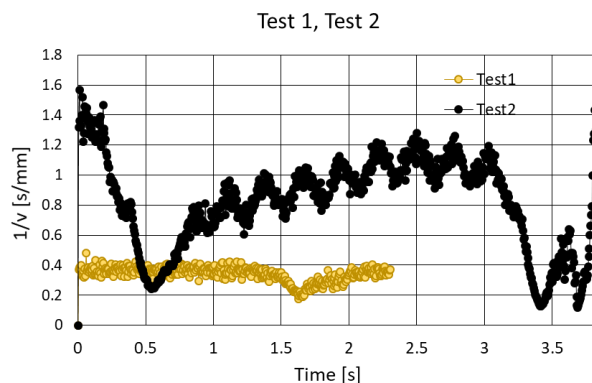


図-2 Test 1, Test 2の表面移動速度逆数

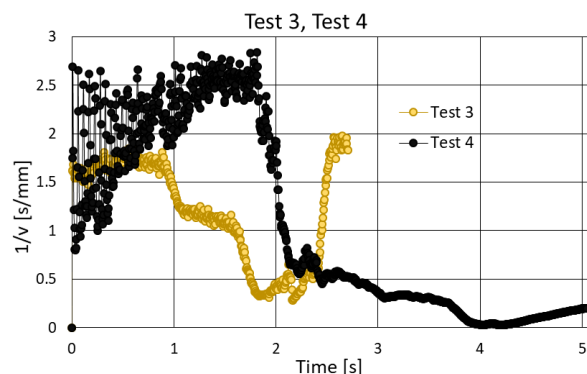


図-3 Test 3, Test 4の表面移動速度逆数

実線の四角枠が観測範囲)。図-1に示す実験例を使用して斜面崩壊の予測手法について検証する。なお、アーチ型崩壊はTest 1とTest 2, 非対称アーチ型崩壊はTest 3, 全体崩壊はTest 4に該当する。図中の赤点は杭の挿入位置を示している。

5. 表面移動速度の測定

(1) 表面移動速度の逆数を用いる理論的見解

表面移動速度の検証方法については、観測領域内(写真-6, 実線の四角枠が観測範囲)で検出された速度の平均値をとり、逆数に変換したものの時間変化を見る。このような方法で、福圓³⁾によって大規模な斜面崩壊について実証実験が行われている。土のクリープ変形特性を考慮すると、砂斜面の崩壊直前の表面移動速度と加速度の関係は次式のように表される。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\frac{dx}{dt} \right)^\alpha \quad (1)$$

ここで、 x : 表面移動量, t : 時間, a, α : 定数である。斎藤⁴⁾が述べるように、砂斜面の崩壊が第三次クリープ段階の場合、 $\alpha=2$ として表面移動速度を逆数表示すると次式のようなになる。ただし、 v : 表面移動速度($=dx/dt$), t_r : 崩壊発生時刻である。

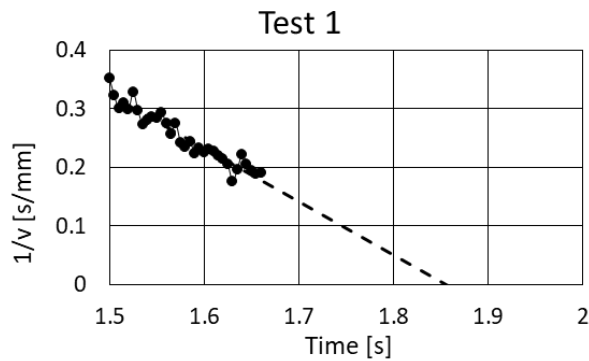


図-4 Test 1の表面移動速度逆数 1.5秒～1.65秒
崩壊発生時刻 1.8秒

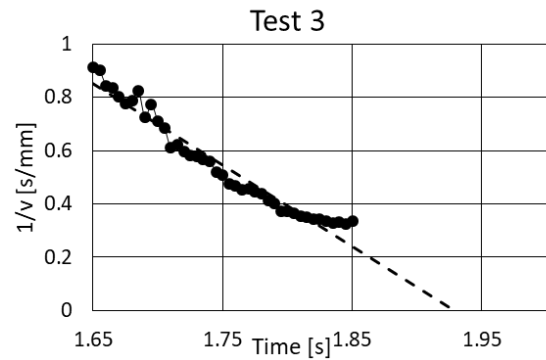


図-6 Test 3の表面移動速度逆数 1.65秒～1.85秒
崩壊発生時刻 2.0秒

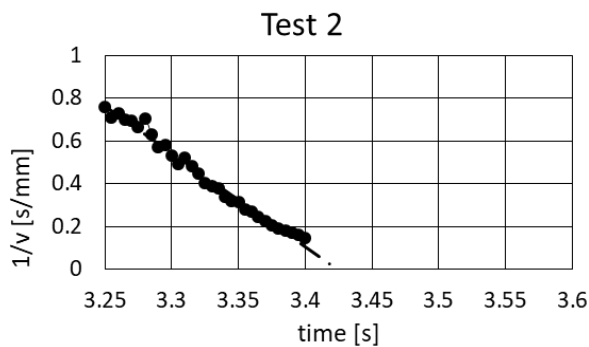


図-5 Test 2の表面移動速度逆数 3.2秒～3.4秒
崩壊発生時刻 3.5秒

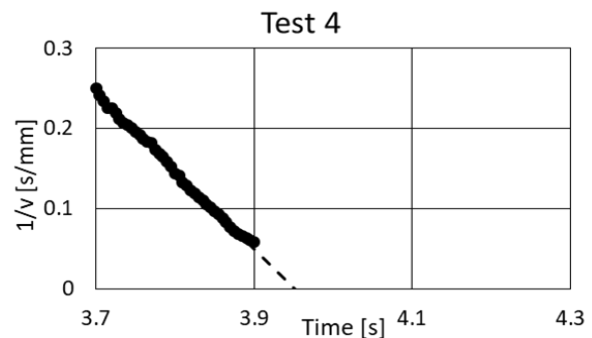


図-7 Test 4の表面移動速度逆数 3.7秒～3.9秒
崩壊発生時刻 4.1秒

$$\frac{1}{v} = a(t_r - t) \quad (2)$$

式(2)より、横軸に時間 t 、縦軸に速度の逆数 $1/v$ をとり、観測データを直線的に近似して表すと、表面移動速度の逆数が0に近似されるときを、推定崩壊発生時刻 t_r として予測することができる。

(2) 表面移動速度の逆数の測定結果

以上の方法で、Test 1からTest 4について速度の逆数変化を求める。式(2)に基づき、縦軸を $1/v$ 、横軸を t として図-2と図-3に示す。なお、2つの実験例を1つのグラフ内に表しているが、それぞれの実験において動画の撮影開始時刻を0秒としているため、横軸の時間 t に関してはTest 1とTest 2、Test 3とTest 4の間に関連性はない。崩壊発生時刻を崩壊面が目視で確認できた時点とすると、Test 1では1.8秒、Test 2では3.5秒、Test 3では2.0秒、Test 4では4.0秒が斜面崩壊時刻であった。図-2と図-3が示すように、斜面崩壊時刻に近づくにつれ、表面移動速度の逆数が増加、つまり速度は減少していき、崩壊間隙で表面移動速度の逆数が直線的に減少、つまり速度は増加している。Test 2の結果に顕著にみられるのだが、斜面崩壊が起こる前の期間(図-2の横軸が1.0秒～3.0秒)において、速度逆数が増減を繰り返している部分がある。これは、杭による補強効果の影響が大きいと考えられる。と言うのも、

杭を設置していないTest 1においては速度逆数が一度減少した後に崩壊が生じており、Test 2においては、時刻0.6秒に一度目の斜面移動と同時に3本の杭が破壊していることから、杭が影響していると言える。また、Test 2の砂斜面が少し滑って止まるという動作をする過程では、杭の支持力が無くなったことにより、スティックスリップ現象のように、動的状態と静的状態が繰り返されているのではないかと推察される。

6. 斜面崩壊の予測結果と考察

本章では、前章で導出した表面速度の結果を用いて、斜面崩壊の予測時刻を求め、実際の崩壊時刻との整合性を検証する。例えば、Test 1において表面移動速度の逆数が直線的に減少する区間1.5秒～1.65秒を拡大し、近似直線を描いてみると(図-4)、崩壊予測時刻はおよそ1.85秒となり、実際の崩壊時刻と近い値を取った。同様に、Test 2からTest 4についても、実際の斜面崩壊時刻と予測時刻が近い値を取る結果となった。

また、杭による補強効果が斜面崩壊予測に与える影響についてもある傾向が見られた。杭を設置していないTest 1と、杭を設置したTest 2からTest 4を比較すると、杭

による補強効果のある斜面(Test 2からTest 4)の方が、実際の斜面崩壊時刻が導出された予測時刻よりも遅くなっていることが分かった。なお、斜面崩壊の前兆が現れる速度逆数の値については実験ごとに統一性が見られなかった。これは斜面崩壊の規模、あるいは動画の解像度の違いに起因すると考察される。

7. 結論

本研究の成果として、模型実験においては斜面崩壊の直前までの表面移動速度を観測することで、実際の崩壊時刻と近い予測時刻を導出することが可能であることを示した。すなわち、表面移動速度の逆数を用いた斜面崩壊の予測手法は、既往の文献^{3,4,5)}における実地実験だけでなく、本研究の珪砂6号を使用した模型斜面においても適応可能であることから、表層崩れが見られる斜面崩壊において幅広く有効性が高い手法であると考えられる。一方、本模型実験における検討過程で問題点となった点のひとつに、動画の解像度や速度導出の際の設定があった。速度の測定においてはその測定精度が速度逆数の値に大きく影響する。しかし、本研究で導出された速度逆数の値や動画の解像度によらず、斜面崩壊前には速度逆数が減少する傾向が見られたため、結果的には斜面崩壊時刻の予測が可能となった。従って、速度逆数の値の大小の、斜面崩壊の予測への影響は小さいと考察される。最終目標である露天掘り鉱山への適応のためには、斜面規模の問題、掘削以外の斜面崩壊の誘因事象(降雨や振

動)の問題といった検討事項が多くあるのが実情である。現在、メモ鉱山では斜面モニタリングが続けられており、表面移動速度の逆数を用いた手法が検討されている。本手法の問題点や実地への応用を考慮する際の問題点について検証することが今後の課題である。

謝辞：本研究はタイ発電公社（Electricity Generating Authority of Thailand）より研究費の助成を受けたものである。心より感謝致します。

参考文献

- 1) Pipatpongsa, T., M. H. Khosravi, and J. Takemura : Physical modeling of arch action in undercut slopes with actual engineering practice to Mae Moh open-pit mine of Thailand." *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE18)*: 943-946, 2013.
- 2) 南出奏 et al.: 模型実験による斜面法尻の掘削に伴う合理的な抑止杭の配置の検討, 第51回地盤工学研究発表会:2053-2054, 2016.
- 3) 福園輝旗: 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* 22(2): 8-13, 1985.
- 4) 斉藤迪孝: 斜面崩壊の予測について (<小特集> 斜面安定), *土と基礎* 20(2): 13-19, 1972.
- 5) 伊藤 和也, 笹原 克夫, 芳賀 博文, 土佐 信一, 南雲 政博, 内村 太郎, 王 林, 矢野 真妃. 施工中の斜面崩壊による労働災害防止のためのモニタリングに関する実地観測-高知県早明浦地区小北川復旧治山工事での観測事例. *地盤工学ジャーナル*, 8.4: 597-610, 2013.

A METHOD TO ESTIMATE SLOPE FAILURE UNDER EXCAVATION USING INVERSE VELOCITY OF SLOPE SURFACE

Kana MINAMIDE, Thirapong PIPATPONGSA, Takahumi KITAOKA
and Hiroyasu OHTSU

The undercutting method applied in open pit mines can weaken the slope and subsequently cause the slope failure during excavation. Therefore, the issue on predicting the time of slope failure requires more research works. Fukuzono (1985) suggested a method of forecasting slope failure time by monitoring the inverse velocity of slope surface. In this study, the inverse velocity observed from physical models following Fukuzono's method was examined. Despite the results can be affected by difference in setting and resolution of monitoring equipment, the inverse velocity approach was found to be effective for forecasting the time of slope failure.