Lecture 現場で役に立つ地すべり工学 第8回 Key points in field work for landslide engineers No.8

4. 監視と予測

Monitoring of landslide movement and forecasting of slope failure occurrence

木村隆俊/株式会社 アイエステー Takatoshi KIMURA/Institute of Slope Technology Co., Ltd.

4.2 崩壊時期の予測と適用例

4.2.1 崩壊時期の予測手法

地すべり崩壊時期の予測は、降雨(降雨強度)を用い るもの、変位量の変化を用いるもの、変位によって引き 起こされる他の現象を用いるものなどがある。降雨によ る方法は、過去における降雨と地すべりの関係で、ある しきい値を超える降雨があった場合に警報を出すもので、 具体的な場所や崩壊時期の予測はしない。変位量の変化 を用いるものは、ヒズミや、ヒズミ速度の変化に注目し て地すべりが崩壊するまでの時間を予測するもので、現 在まで様々な予測式が提案されている。地すべりによっ て引き起こされる他の現象を用いる手法は、主に地すべ り滑動によって発生する音や、物が破壊するときに発生 するアコースティックエミッション(AE)を計測して その発生頻度の変化により崩壊の可能性を判断するもの であるが、崩壊予測時間を推定する手法は確立されてい ない。

地すべり崩壊時期の予測に用いられている一般的な方 法は、地すべりの変位量の変化に注目する方法である。 この方法は、最初、斎藤(1959)によって提案された方 法で、クリープ破壊理論に基づいている。クリープ破壊 とは、材料が降伏値以上の一定の応力下に長時間置かれ た場合、ひずみ(クリープひずみ)が時間の経過ととも に進行する現象で、一般的には、瞬間的な弾性変形とこ



横山 昇/株式会社 アイエステー

Noboru YOKOYAMA / Institute of Slope Technology Co., Ltd.

れに続くひずみ速度が減少する粘弾性変形の時期の1次 クリープ(遷移クリープ),ひずみ速度一定の粘性流動 の時期の二次クリープ(定常クリープ),ひずみ速度が 増大して破壊に至る三次クリープ(加速クリープ)の時 期に分けられる(図-1)。

斎藤・上沢(1960)は、土のクリープ破壊に注目して、 ひずみ速度とクリープ破壊時間の間に一定の関係を見い だして、崩壊までの時間の予測が可能であることを示し た。この考え方は、その後、斎藤(1968)、斎藤ら(1968)



図-1 クリープ破壊時のクリープ曲線の例

 Q_1 (時間 T₁) における速度の逆数 曲線の接線と時間軸との交点を T_{e1} とする. T₁Q₁の延長上に T₁t_{e1}=T₁ P₁なる点 P₁を求める.同様に, Q₂(時 間 T₂)における接線から点 P₂を求め る. P₁P₂の延長線と時間軸との交点 が崩壊時刻 t_rである. によって集大成された。山田ら(1970)は、この考え方 を飯山線高場山トンネルの地すべりに適用して、良好な 結果を得ている。渡ら(1977)は、真名川ダムの原石山 切取り法面の崩壊に適用した。福囿(1985)は、移動速 度の逆数と崩壊までの時間の関係について検討し、斎藤 の考え方に合わない事例についても崩壊時期の予測方法 を示した。また、福囿(1990a, b)は、平均速度の逆数 による斜面崩壊発生時刻の予測の図で、接線法による崩 壊時刻の予測法について解説している(図-2)。

駒村・林(1983)は、地すべりのレオロジーモデルついて考察し、地すべりのタイプを減速クリープ型、定常クリープ型、崩壊クリープ型に分類し、それぞれのタイプについて検討した。林ら(1988)、土屋・大村(1989)は、様々な崩壊時期の予測式について検討し、大村らの予測式も含めて、それぞれの予測式を線形化して、線形式の最小自乗法を用いて崩壊予測時間の特性について検討した。これらはいずれも、移動量-時間の関係を基に崩壊までの時間を予測するものである。

4.2.2 地すべり現場での崩壊時期の予測方法

地すべりが発生している現場では、地すべりの移動の 状況に即応して判断する必要がある。ここでは、主とし て一般に用いられている斎藤の三次クリープ段階での予 測法について述べる。

(1) 斎藤の崩壊時期予測式

土のクリープ破壊理論を根拠にして地すべりの崩壊時 期予測が可能であることを示したのは,斎藤(1960)が 最初である。土のクリープ破壊試験結果では,時間とひ ずみの関係は,前述(図-1)のように,三つの時期に 分けられる。

斎藤は、二次クリープ段階での予測と、三次クリープ 段階での予測手法を提案した。様々な土質試料について のクリープ破壊試験から二次クリープ段階の定常ひずみ 速度と、クリープ破壊時間との間には、図-3に示すよ うに両対数のグラフで直線関係があることを見いだし、



(両対数表示)(斎藤・上沢1960)

次式のように定式化した。さらに、この関係を用いて、 地すべり崩壊時期(斜面崩壊時期)の予測が可能である ことを示した。

 $\log_{10} tr = 2.33 - 0.916 \times \log_{10} \dot{\varepsilon} \pm 0.59$ (4)

ここに tr:クリープ破壊時間(分)

έ:定常ひずみ速度(×10⁻⁴/分)

±0.59:試験結果の95%を含む幅

この式は、崩壊までのクリープ破壊時間を、定常ひず み速度の指数の一次関数として表現され、一般には両対 数のグラフで描かれている。両対数のグラフでは、実際 の時間とひずみ速度との関係がイメージとして捉えにく いので、対数でない通常グラフで表現すると図-4のよ うになる。

また、上式においてlog₁₀ $\dot{\epsilon}$ の係数(0.916)を1とみ なすとともに上式のクリープ破壊時間(tr)は一次クリー プ開始から三次クリープ最終の破壊までの時間を示して いるが、通常の地すべりでは一次クリープの開始時期は 明らかでないことから、上式のtrを観測時点(t_0)から 破壊までの残り時間(tr-t:この場合のtrは崩壊時刻を 意味し、(4)式の破壊時間とは異なる)とし、また、定常 クリープひずみ速度($\dot{\epsilon}$)を観測時点におけるひずみ速 度とみなすことにより、上式を拡張応用し、斎藤は三次 クリープの段階においては、tr-tと $\dot{\epsilon}$ とが逆比例の関係 にある式として、 $\dot{\epsilon} = A/(tr-t)$ を提案した。この式が 三次クリープ段階における斎藤の予測式であり、 $t = t_0$ におけるひずみ量 $\epsilon_0 = 0$ として $\dot{\epsilon}$ を積分すると

また、 Δl :移動量、b:基準長とおき、 $\varepsilon = \Delta l / b$ とみな すと

となる。

この式で,崩壊時刻を予測することは,trを求めることであるが,時刻tの時の移動量/llは計測でもとめた既



図-4 定常ひずみ速度と崩壊までの残り時間の関係図 (通常グラフ表示)

講座

知数であり、未知数はtr以外にlo・Aとtaとの3個である ので、クリープ曲線上の3点が得られれば、崩壊時刻tr を求めることが出来る。

クリープ曲線上の3点を (Δl_1 , t_1), (Δl_2 , t_2), (Δl_3 , t_3) とし, $l_0 \cdot A$, $t_7 - t_0$ を消去すると

いま $\Delta l_2 - \Delta l_1 = \Delta l_3 - \Delta l_2$ にとれば,

あるいは整理して,

$$t_r - t_1 = \frac{\frac{1}{2}(t_2 - t_1)^2}{(t_2 - t_1) - \frac{1}{2}(t_3 - t_1)} \cdots (10)$$

となり、これが斎藤の図解法の基礎式である。

実際の地すべりでは、図-5のように地下水位の変化、 応急対策工の施工、その他様々な要因の変化によって、 1次クリープの後地すべりが一時停止したり、二次ク リープが長期間継続して三次クリープに移行せずに停止 したりするので、時間-変位曲線の変化を常に監視し、 斎藤の三次クリープの予測が適用できるか否かを判断す る必要がある。

(2) 斎藤の図解法の基礎式を用いて表計算ソフトで崩壊時刻を予測する方法

斎藤の図解法の基礎式のたは、計算を実施する基準の 時刻で、その時の変位量を*Δl*₁とする。最新の時刻をたと して、その時の変位量を*Δl*₂とする。斎藤の図解法の基 礎式は、

 $\Delta l_2 - \Delta l_1 = \Delta l_3 - \Delta l_2$ としているので、時間変位グラフ上 で $\Delta l_2 = (\Delta l_3 - \Delta l_1)/2$ となる点を求めてその時の時刻が t_2 となる。この t_1 , t_2 , t_3 を(10)式に代入すると、崩壊時間trが求まる。



実際には、表計算ソフトに観測の累積時間とその時の 累積変位量を第1列と第2列に入力し最新の4kで第3 列に4kを求めるようにする。その4kの値が、累積変位 量の列でどのセルとのどのセルの間にあるかを自動検索 させ、その間の行に4kの値を挿入し上下のセルの変位 量の割合から累積時間 t2を自動計算で求め、第4列に 入力する。このt2と基準点のt1、最新の時間t5で崩壊予測 時間trを求め第5列に入力して図化すると図-6の観測 グラフと崩壊予測時間の図が出来上がる。

4.2.3 実測データに基づく崩壊時期の予測

(1) 奈良県大塔村

奈良県大塔村の地すべりは、白亜紀の四万十累層群日 高川帯で発生した地すべりで、図-7に示すように断面 形は、ほぼ直線状のすべり面をしており、末端部は急斜 面となっている。地すべりは平成16年1月下旬に亀裂が 発見され、8月10日に崩壊した。

大塔村の観測データでは、地すべり頭部の中央部に設置された伸縮計S-6の観測データに(4)式の定常ひずみ速度と崩壊までの残り時間の関係図を重ねると図-8のようになる。この図では、実際の観測データは、崩壊発生の25日前頃から斎藤のクリープ曲線にほぼ一致するようになってきた。

この観測データを基に崩壊時期の予測を実施すると, 図-9~11のようになる。これらのデータでは、比較の ために観測の最初の時点(崩壊前103日)を基準にした





もの,斎藤のクリープ式に一致した時点(崩壊前23日) を基準にしたもの,変位量が立ち上がり始めて三次ク リープに移行したと考えられる時点(崩壊前10日)を基 準にしたものの,3時点の基準で斎藤の三次クリープ式 により崩壊時期の予測を実施した。

観測開始時点を基準にしたものでは、図-9の予測の ようになり、ある程度変位量が大きくなるまでは崩壊時 期の予測の誤差は大きい。斎藤のクリープ式に一致する ようになる時点を基準とする(図-10)と、最初は実際 の崩壊時間より未来の崩壊を予測するようになっている が、崩壊時期に近づくと実際の崩壊時間を予測するよう になる。さらに、変動速度が増して3次クリープに移行 したと考えられる、0.2mm/時程度になった時点を基準 点とすると(図-11)、崩壊予測時間が実際の崩壊時間 に重なるようになって、全体を通してほぼ正確な崩壊時 期の予測をするようになる。

これらのことから斎藤のクリープ式に載るようになっ た時点を基準とした場合でも,ある程度の崩壊時期の予 測は可能で,さらに三次クリープに移行した時点では基 準点をその時点に移動して予測すれば,さらに正確な予 測が出来るようになる。

(2) 地附山

長野市,地附山地すべりは,昭和48年頃より道路構造物に地すべり性の変状が認められるようになり,その後



図-8 斎藤のクリープ式と大塔村S-6の重ね合わせ



の伸縮計の観測では昭和60年7月18日より変位が大きく なりはじめ、7月26日17時に約550万m³の土塊が流出し た。地質は、第三紀の裾花凝灰岩類が分布する地域で、 主測線の断面を、図-12に示す。

崩壊の8日前からの伸縮計の観測記録を基に崩壊時期 の予測を実施してみると図-13のようになる。崩壊発生 の60時間前頃に変位速度が一旦遅くなる箇所があり,崩 壊8日前を基準とすると,この変位速度が遅くなった影 響を受けて崩壊時期の予測時間は実際の崩壊時間と異 なったものとなる。基準点を,変動速度が遅くなった崩 壊2日前に取り直すと図-14のようにほぼ正確な崩壊時 期を予測するようになる。

(3) 高場山

高場山地すべりは、旧国鉄飯山線の高場山トンネルに 隣接した斜面で、昭和45年1月22日午前1時24分に崩壊 した。地質は、新第三紀の粘土質頁岩・砂岩の互層が分 布する地域である。地すべり断面図を図-15に示す。こ の地すべりは、昭和44年4月の雪解けでトンネルの坑門 口に変状が発生していた。地すべりの頭部亀裂は12月4 日に発生し、伸縮計を設置して観測が開始された。

昭和45年1月14日からの観測データで,崩壊時期を予 測すると図-16~17のようになる。図-16は崩壊発生8 日前の1月14日を基準として崩壊時期を予測したもので あるが,変位速度が一定の時間が長く,崩壊予測時期は 実際の崩壊時間と大幅にずれる。図-17のように,基準



図-10 大塔村崩壊23日前を基準点にした予測図



図-11 大塔村崩壊10日前を基準点にした予測図

座 譜







図-13 地附山崩壊8日前を基準点にした予測図



図-14 地附山崩壊2日前を基準点にした予測図









図-17 高場山崩壊1日前を基準点にした予測図

点を変位速度が立ち上がり始めた三次クリープの始まる 崩壊発生1日前とすると崩壊時期の予測は,ほぼ実際の 崩壊時間に一致する。

(4) 柳谷

柳谷地すべりは、愛媛県上浮穴郡柳谷村の仁淀川に面 した国道33号が河川に平行して走る。この地すべりの地 質は、古生代の秩父帯に位置し、砂岩、粘板岩が分布し ている。斜面は図-18に示すように、急峻で平均勾配は 40~60度である。昭和54年に国道の改良工事が着手され



図-18 柳谷地すべりの断面図(関ら, 1980)



図-19 柳谷地区崩壊21日前を基準にした予測図



た段階で,上部斜面に亀裂が発生し,6月29日から伸縮 計を設置して観測が実施された。柳谷では,当初等速変 位をしていたが崩壊の10日前頃から変位速度が増加し始 め,変位速度が127mm/時になったところで崩壊した。 柳谷地区での崩壊時期の予測は,基準点を観測開始時点, 等速運動の中間点,変位速度が増加し始めた時点にとっ てそれぞれ崩壊時間を予測したのが,図-19~21である。 この3つのケースの内,比較的崩壊時間を正確に予測し ているのは,図-21の変位曲線が立ち上がり始める崩壊 発生3日前を基準とした場合である。このことから,二 次クリープが長時間継続している場合は変位が多少加速



図-21 柳谷地区崩壊3日前を基準にした予測図



し始める時を基準として,変位予測するのが望ましい。 (5) La Clapiére

La Clapiére地すべりは南フランスの南アルプス山中に 位置している。この地すべりは、古生代のミグマタイト 化した片麻岩の分布する地域に発生した地すべりで、 1982年に発生し、変動量は光波測距儀を用いて計測され ている。地すべり滑動は、1988年に一度大きく変動し、 その後も変動が継続している。地すべりの規模は、幅 1300m、奥行1000mで、断面図を図-22に示す。1988年 の変動では、落差80mの主滑落崖が形成されているが、 その後も平均1 cm/日の割合で変動している。1988年 8 月の大変動の時は、8.8cm/日の変動であったが、その

講 座

時の観測データを用いて崩壊時期を予測したのが,図-23~25である。この地すべりの変動は,崩壊の6,000時 間(250日)前頃に変動速度の増加が減少して,一息つ くような変位を示している。このため,これより前に基 準点を設けた場合は,この変位曲線のふくらみの影響を 受け,図-23,24に示すように崩壊時期の予測はふらつ くこととなる。基準値を,変位曲線のふくらみの後の 220日前を基準値とした図-25では,崩壊時期の予測時 間は,実際の崩壊時間とほぼ一致するようになる。

一度大きく変位した後,変位速度が減少した部分も含 んで崩壊時期を予測すると,図-26に示すように予測時 間は未来の方に延びてゆき,崩壊しない予測となる。



図-23 La Clapére崩壊1034日前を基準にした予測図



図-24 La Clapére崩壊715日前を基準にした予測図



図-25 La Clapére崩壊220日前を基準にした予測図

(8) Chuquicamata鉱山

Chuquicamata鉱山は、南米チリのアンデス山脈の中 にある露天掘りの銅鉱山で、ベンチカットされていた切 り取り岩盤法面が崩壊した。崩壊した法高は、248mあ り、法面の平均勾配はおよそ43度であった。地すべり (岩盤崩壊)の発生原因は、1967年12月の地震と、鉱石 を採掘するための発破とされている。その後計測機器が 設置され観測が行われたが、1969年2月18日に大崩壊が 発生した。地質は、結晶斑岩と銅鉱石の混在物で構成さ れている、崩壊前の断面を図-27に示す。

この鉱山の変位の特徴は、岩盤の地すべりのため変位 速度は直線的で、ある時期変位速度が増加してもその後 再び直線的な変位速度を示していることである。このよ うな変位を示す地すべりの崩壊時期を予測すると図-28 に示すようになり、変位速度が増加した付近では、ある ところで崩壊時期の予測時間に近づくが、その後は、実 際に崩壊した時間よりも後のほぼ同じ崩壊予測時間を示 し、あたかも崩壊がその時刻で発生するような予測とな るが、実際の崩壊は予測時期よりも早く発生した。この 場合は、露天掘り鉱山という特殊な場所で、あったため



図ー26 La Clapére崩壊後さらに地すべり変動をした場合の 予測図



J. of the Jpn. Landslide Soc., Vol.43, No.3 178 (2006)



図-28 Chuquicamata鉱山崩壊45日前を基準点にした予測

に、岩盤の風化は進んでおらず、亀裂に沿ったすべり面 で末端部の抵抗が全くない場合には、崩壊予測時期より も早く崩壊することを示しているようである。

4.2.4 まとめ

地すべりが発生した場合,通常は地下水排除工,緊急 押え盛土, 頭部排土工が実施されたり, 降雨が少なく なったりして地すべりの安定性のバランスが変化して, 二次クリープの段階で停止したり、さらに地すべりが三 次クリープに至ったとしても, 崩落するまでの間に変位 速度を低下させたり、再び変位速度を増加させたりする 場合がよくある。また、三次クリープになったと判断し た後で、変位速度が低下して崩落せずに小康状態を保つ 場合もある。その一因として岩盤崩壊の場合とは異なり, 地すべりは主に間隙水圧が一定以上作用することにより, 地すべり移動を開始するという特性もある。また、地す べりは、すべり面、地質特性から、渡ら(1987)の地す べりの分類にもあるように、すべり面の形状が異なり、 それにより崩壊するか否かも大きく左右されるものと思 われる。したがって、崩壊時期の予測を実施する場合に は、これらの諸条件も加味して総合的に判断することが 大切である。

次回では、地すべりの警戒,避難基準値とその体制に ついての考え方や、今回掲載した崩壊時期の予測と警戒 基準の関係について、事例を踏まえて紹介する。

参考文献

- Barry Voight, B. A. Kennedy (1984) : Rockslides and Avalanches,
 2, Chapter 17, Slope failure of 1967 1969, Chuquicamata Mine,
 Chile, pp. 595 632.
- B. Casson, C. Delacourt, P. Allemand (2005) : Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface-Application to the La Clapiére landslide (France), Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, pp. 425 – 437.
- 福囿輝旗(1985):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.
- 福囿輝旗(1990a):平均速度の逆数による斜面崩壊発生時刻の予 測,防災科学研究所研究報告,第46号,pp.45-81.
- 福囿輝旗(1990b):クリープ変形式を基にした斜面崩壊時刻の予 測について、地すべり、Vol.27, No.2, pp.38-40.
- 林拙郎・駒村富士弥・朴甫源 (1988):斜面崩壊発生時期の予測に ついて,地すべり, Vol.24, No.4, pp.11-18.
- 地附山地すべり記録誌編集委員会(1989):復旧への足跡-地附山 地すべり対策事業の記録-,長野県長野建設事務所,113p.
- 駒村富士弥・林拙郎(1983):地すべり性崩壊発生時期の予測に関 する研究(地すべり挙動のレオロジー), pp.1-64.
- 野村康裕・藤澤和範(2006):地すべりの運動特性を考慮したリス クマネジメントに関する一考察~奈良県大塔村で発生した地す べり道路災害を例として,地すべり,Vol.42,No.6,14p.
- 斎藤迪孝(1959):斜面崩壊と歪測定,土と基礎,特別号,No.1 pp.29-33.
- 斎藤迪孝・上沢弘(1960):土のクリープ破壊に関する実験研究, 鉄道技術研究報告, No.128, pp1-9.
- 斎藤迪孝(1968):斜面崩壊発生時期の予知に関する研究,鉄道技 術研究報告, No.626(施設編第267号), pp.1-53.
- 斎藤迪孝・上沢弘・今井重利・毛受貞久・安田祐作(1968):鉄道 技術研究報告, No.630(施設編第271号), pp.1-61.
- 関信雄・堀伸三郎・成田賢(1980):柳谷地区岩盤斜面の崩壊予測, 応用地質調査事務所年報, No. 2, 28p.
- 土屋智・大村寛 (1989):斜面崩壊時刻の予測法と適用結果について,地すべり, Vol.26, No.1, pp.1-8.
- 渡正亮・竹林征三・松田六男(1977):真名川ダムの原石山切取法 面崩壊の特性,地すべり, Vol. 13, No. 4, pp. 1-10.
- 渡正亮・小橋澄治(1987):地すべり・斜面崩壊の予知と対策,山 海堂, pp.41-46.
- 山田剛二・小橋澄治・草野国重・久保村圭助(1970):飯山線高場 山トンネルの地すべりによる崩壊,鉄道技術研究報告, No.706 (施設編第304号), pp.1-51.

(原稿受付2006年6月8日, 原稿受理2006年8月25日)