地すべり変位速度の指数関数的低減現象

Exponential decrease phenomenon of the landslide displacement velocity

神原規也^{a)}*

Noriya KAMIHARA

Abstract

Landslides during the deceleration phase tend to exponentially decrease their displacement velocities. Such phenomena suggest the exponential reduction of the factor concerning rainfall as a cause of the landslide instability. It is expected that indices of the landslide stability can be estimated by the rainfall intensity. An approach to evaluate the correlation between the landslide displacement velocity and the tank model storage depths was reported recently¹⁾. This indicates that landslide stability indices can be obtained directly from precipitation. Here the author reports a case where primary, secondary and tertiary creeps were discriminated respectively by the ratio between the displacement velocity and the tank model storage depths. On the other hand, the primary creep sometimes occurs regardless of the factor concerning rainfall. This phenomenon indicates the temporal change to increase "the strength of slide surface" in the active landslide.

Key words : landslide displacement velocity, exponential decrease, primary creep, tank model, rheology

和文要旨

滑動中の地すべりにおいて、地すべり変位速度は減速域では指数関数的低減傾向を示すことがある。この原因には、降雨に由来する地すべり不安定化要因の指数関数的低減が挙げられる。この評価手法として、地すべり変位速度とタンクモデル貯留高の相関関係も指摘されている¹⁾。このことは、降水量から直ちに地すべり安定度の指標が得られることを意味する。本論文では両者の比率から1次、2次、3次クリープの識別事例の報告を行う。一方、降雨による要因とは無関係に1次クリープの現象が生じている場合があり、滑動中の地すべり地における「すべり面強度」の経時的増加の可能性を示唆する。

キーワード：地すべり変位速度、指数関数的低減、1次クリープ、タンクモデル、レオロジー

1. はじめに

地すべり変位速度の検討対象を急速な流下現象を除く時速数十cm程度以下までに絞ると、運動エネルギーの地すべり変位速度に与える影響は無視しうる値である。このような緩速な移動・変形を呈する地すべり現象の変位速度変動メカニズムを、レオロジーの面から解明しようという試みは古くから行われ^{2), 3), 4)}、3次クリープから崩壊に至る過程の解析を通じて崩壊時刻の予測を試みた斎藤に始まる手法^{5), 6)}などの成果も得られている。しかし、大半の地すべり地においては、破局的な崩壊に至ることなく一旦停止し、あるいは更に滑動を繰り返すといった複雑な動きを見せている。滑動中の地すべりがいつ停止するのかという問題は、警戒避難態勢の解除などの判断に不可欠であり、さらになぜ、どのようにして停止するのかというメカニズムの解明は、地すべりの抑止や抑制の検討にも関連する基本的な課題の一つである。

断続的な滑動を繰り返しているように見える地すべり現象も、地すべりの変位速度に着目すると一定の規則性を示していることがある。特に地すべり変位速度の減速域においては指数関数的低減傾向を示す事例が認められる。まとまった降雨の度に滑動と停止を繰り返すような地すべりが、減速域では指数関数的低減傾向を示し、さらにタンクモデルの貯留高と一定の相関性を示す事例のあることが指摘されている¹⁾。地すべり滑動力： ΣT が

地すべり抵抗力： ΣN を上回る際の応力の値を差応力： $\sigma (\sigma = \Sigma T - \Sigma N)$ と定義すると、この差応力の地すべり変位速度に及ぼす影響が、降雨の停止に伴い指数関数的に低減していることを示している。一方、降雨に起因する要因とは無関係に、また地すべり移動体の全体形状の顕著な変形も伴わずに、地すべり変位速度が指数関数的に低減し、時に地すべりの停止にまで至る1次クリープ的現象が生じる事例も見られる。このような現象の説明には、移動中の地すべりにおけるトータルとしての「すべり面強度」の経時的な増加を要因の一つに挙げる必要がある。

ところで近年、自動観測システムの普及に伴い、高い測定精度の観測データを密な時間間隔で取得することが容易になり、このような地すべり変位速度の変化と降水量、さらには地下水位相互の関係をより詳細に把握することが可能となっている。この降水量から直接算出される値であるタンクモデル貯留高は、地すべり変位速度との間に一定の相関性を示すことがあることから、このタンク貯留高を指標に加え、これら相互の相関関係の検討を行い、レオロジー面からの評価の可能性について検討を行った。

なお、「地すべり移動速度」という表現は、地すべりが一体化して等速度の移動・変形を生じているという印象を与えるが、地すべり現象に伴う地すべり移動体の変形は必ずしも頭部から末端部まで一様でない場合がある。ここでは「地すべり変位速度」という表現を用いることとし、特に断らない場合には通常最も変位量の大きな地

* 連絡著者／corresponding author

a) 株式会社エイトコンサルタント和歌山支店技術部

EIGHT CONSULTANTS CO. LTD.

〒640-8203 和歌山市東蔵前丁4番地 ファーストビル

4 Higashikuramaechou Wakayama City 640-8203, Japan

すべり冠頭部において、地盤伸縮計などで観測された地すべりの変位速度を用いることとした。

2. 地すべり地の概要

本検討に用いた地すべり地の概要を表-1に示す。

2.1 S地区

S地区は徳島県東南部の国道沿いに発生した地すべりで、ブロック側方部の吹き付け法面の小崩壊に伴い、頭部の亀裂が発見されたものである。小崩壊発生の日ほど前に80mm程度の日雨量を記録しているが、その後目立った降雨には見舞われず、無降雨時に突然法面の一部が崩壊し、この背後の地すべり性の亀裂が発見された。地すべり発見後直ちに冠頭部に伸縮計を設置し観測を開始した。S地区は常時1~2mm/d以上の基底的な地すべり変位速度を保ちつつも、降雨の度に地すべり変位速度の増減を繰り返し、最終的には3次クリープ領域を経て崩壊に至っている。

2.2 T地区

T地区は紀伊半島を東西に横切る中央構造線に沿って伸びる紀ノ川の南部約1.5kmに位置している。標高300~500m程度のなだらかな段丘状の広大な丘陵斜面の側方部に形成された崩積土層地すべりで、梅雨期の豪雨を契機に顕在化した地すべりである。T地区の地すべりは平常時には停止しているものの、降雨に伴い地すべり変位速度の著しい増減が生じたもので、孔内水位と地すべり変位速度にも一定の相関関係が認められた。

2.3 Y地区

Y地区はT地区の東北東約18km付近に位置する、紀ノ川南岸支流沿いの地すべり地である。地すべり深度の浅い小規模な崩積土層地すべりがあるが、すべり面は40°弱のかなり急な勾配を有している点が特徴的である。地すべりブロック末端部の掘削に伴い地すべり現象が急速に活発化したもので、直ちに掘削部分を埋め戻すとともに、大型土のう（通称トン袋）による抑え盛土工を4~5段にわたって実施し、同時に地盤伸縮計による監視を開始した。Y地区は定常的な地すべり変位速度を保ちつつ、降雨時には地すべり変位速度の著しい増減を見せていたが、この過程で明瞭な1次クリープ及び歪硬化の現象が見られている。

3. 降雨に起因して活発化した地すべりにおける降雨後の地すべり変位速度の指数関数的低減現象

3.1 2次クリープ段階の地すべりにおける降雨に起因する地すべり変位速度の指数関数的低減現象（S地区の事例）

2次クリープ段階にある地すべりは、本来基底値としての定常的な変位速度を有しているが、これに降雨の影響が加わり地すべり変位速度が大きく変化する場合がある。

図-1に示されるように、まとまった降雨の度に急増した地すべり変位速度は、その後無降雨期間が続く限り一定の割合で減速し、片対数グラフ表示で直線状の変位速度低下として現れる指数関数的低減傾向を示すことがある。このような歪速度の指数関数的低減を説明する基本的なレオロジーモデルには、通常図-2に示すフォークトモデルがまず挙げられるが、降雨のたびに幾度も指数関数的低減傾向を示す現象をフォークトモデルで代表されるような単純な1次クリープ現象として説明することはできない。

ところで、図-3の模式図に示されるタンクモデル各段の貯留高($h_1 \sim h_4$)は、降雨によってタンク内に貯留された水が貯留高に比例した一定の割合で流出孔や浸透孔から流出するというメカニズムを有し、降雨による供給が停止すると各段のタンク貯留高は指数関数的に低減する。図-1に示されるS地区の地すべり変位速度も、降雨を契機に幾度も上昇した後の低減域では、その度に同様な指数関数的低減傾向を示し両者の相関関係を予想

図-1 S地すべり 降水量，移動量，対数表示地すべり変位速度図

Fig. 1 Change of precipitation, total displacement and logarithmic velocity in S-Landslide

図-2 フォークトモデル
Fig. 2 Voigt model

表-1 地すべりの概要
Table 1 Outline of landslides

地区名	徳島県 S地区	和歌山県 T地区	和歌山県 Y地区
地すべりの タイプ	初生的岩盤 地すべり	崩積土層 地すべり	崩積土層 地すべり
基盤地質	秩父帯 頁岩主体層	三波川帯 結晶片岩類	三波川帯 結晶片岩類
り地 模の す規 べ	斜面 長	50m	110m
	幅	40~50m	40~70m
	平均 層厚	13m	5m
すべり面 平均勾配	40°	18°	40°

させる。しかし、菅原によって長短期の流出解析のために考案されたタンクモデルは、本来実測された流出量からの逆算によって各定数が同定されるものであり、タンクモデル貯留高と地すべり変位速度の比較を行う場合、この定数の設定方法が問題となる。ここでは、まず菅原が長期流出解析の出発点として用いているタンクモデル⁷⁾の各定数をそのまま用い、最上段から下段へ順次各段の合計貯留高を求め、地すべり変位速度との比較を行った。この過程を図-4の最上段グラフに、1段目及び上部から2～4段目までのそれぞれの合計貯留高をいずれも片対数表示したものを図-4の2段目のグラフに示す。ついで、これらの幾つかのモデル中から一定の相関関係が認められるモデルを試行錯誤の末に求め、4段目までの合計貯留高と地すべり変位速度を重ねあわせたものを図-4の3段目に示す。ここに示されるように「相関性の高い期間」とされる期間、この両グラフはほぼ相似形を示し、また地すべり変位速度(V)と4段目までのタンク合計貯留高(H)の比率(V/H)も一定の範囲に収まり、図-5-a、図-5-bに示すように相関係数は両対数散布図で $R=0.887$ 、通常の散布図でも $R=0.888$ という相関関係が得られている¹⁾。

ここではタンク合計貯留高が、2次クリープ領域にある地すべりにおける降雨による不安定化要因である差応力 σ の指標となっていると考えられる。

なお、この事例では流域の実測流量からの逆算によって求められたタンクモデル定数は菅原のモデルと大きく

異なるものの、地すべり変位速度と4段目までのタンクモデル合計貯留高の間には同程度の相関性が得られている¹⁾。検討対象地の流域の実測流量が得られない場合でも、菅原のモデルのような一般値によって、地すべり変位速度との間に一定の相関性が認められる可能性があり¹⁾、本研究で用いるタンクモデルの諸定数は、この菅

図-4 S地すべり $\log V$ - $\log H$ 比較図
Fig. 4 Correlation between $\log V$ and $\log H$ in S-Landslide

V : 地すべり変位速度(mm/d)または(mm/h)

H : タンクモデル合計貯留高(mm), $H=h_1+h_2+h_3+h_4$

h_1, h_2, h_3, h_4 : タンクモデル上段から各段の貯留高(mm)

図-5-a S地すべり V - H 相関図
Fig. 5-a V - H diagram of S-Landslide

図-5-b S地すべり $\log V$ - $\log H$ 相関図
Fig. 5-b $\log V$ - $\log H$ diagram of S-Landslide

図-3 菅原のタンクモデル
Fig. 3 Sugawara's tank model
 h_1, h_2, h_3, h_4 : Storage depth
 q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 : Run off

原のタンクモデルなどの一般値を用い、最上段からの合計貯留高を順次用い、最も高い相関性の選られるタンクモデルを用いて検討を行う事とした。

なお、S地すべりでは図-4の「相関性の高い期間」以後の期間は、地すべり変位速度が急加速する前の段階において、タンクモデルの合計貯留高の対数表示値 $\log H$ は指数関数的低減傾向をみせる一方で地すべり変位速度の対数表示値 $\log V$ は定常的速度を維持し、図-4下段のグラフに示されるように V/H の比率が増大してゆく過程として3次クリープ領域の初期段階が明瞭に現れている。

3.2 降水量・地すべり変位速度・孔内水位に一定の相関性が認められる事例 (T地区)

前述のS地区は観測期間を通じて孔内水位が形成されることは無く、地すべり移動地塊のほとんどは不飽和状態にあったと考えられる。次いで、すべり面周辺が常に飽和状態にあったと考えられ、降雨と地すべり変位速度・孔内水位の間に一定の相関関係の認められた事例について検討を行う。

3.2.1 降水量と地すべり変位速度の相関関係

地すべりの移動状況の監視には全自動観測方式の伸縮計を用い、1時間毎の変動量を0.2mmの精度で観測した。図-6に示されるように、S地区とは異なり、観測期間を通じて断続的に2回の大きな変動を見せている。8月10日21:00～8月14日6:00にかけては15.4mm、9月21日4:00～9月23日4:00にかけては70.8mmの伸

図-6 T地すべり 地盤伸縮計変動図

Fig. 6 Change of precipitation and total displacement in T-Landslide

図-7 T地すべり 降水量, 移動量, 対数表示地すべり変位速度図

Fig. 7 Change of precipitation, total displacement and logarithmic velocity in T-landslide

び変動を見せている。一方で観測期間を通じての最大日雨量72mmを示す10月27日には殆ど動きを見せていない。最も大きな動きを見せた9月22日の日降水量26.5mmは図-6に○囲みの数字で順位が示されるように観測期間を通じて6番目のものであり、ここでは地すべりの安定度は日降水量だけでの評価は出来ない。

次いで、最大の変位を示した9月22日における対数表示した1時間毎の地すべり変位速度と時間降水量の状況を図-7に示す。地すべり変位速度は最大時間雨量12.5mm/hを記録した9月22日4:00～5:00の直後である5:00～6:00には8.0mm/hへと急激に上昇し、6:00～7:00の8.4mm/hをピークにして、その後は降雨の停止と共に対数表示ではほぼ直線状に低減する明瞭な指数関数的低減傾向を見せている。

3.2.2 降水量と孔内水位の相関関係

1) 孔内水位の変動状況

当地区では図-8の断面図中のBV-1, BV-3に併設して深度7mの水位観測孔を設け、地すべり発生から約5ヶ月にわたって孔内水位の観測を実施した。観測は水圧式の半自動観測を用い、毎正時の孔内水位を記録した。観測期間を通じた日変動結果を図-9にまとめる。

冠頭部に設置されたBV-1孔は降雨に対する反応はやや鈍く、10月下旬以降は水位変動を示さなくなった。一方、地すべりブロック中央部に設置されているBV-3孔の孔内水位は観測期間を通じ、降雨に敏感に反応して上下している。また、図-9に○囲みの数字で示されるように、地すべりが最も大きな動きを見せた9月22日に最も高い孔内水位を記録している。

図-8 T地すべり断面図

Fig. 8 Geologic profile of T-Landslide

図-9 T地区水位変動グラフ

Fig. 9 Change of ground water level in T-Landslide

2) 日単位の孔内水位とタンク合計貯留高の相関関係

図-9に示されるように、孔内水位についても当日だけでなく数日前からの雨量も影響していることが推定される。この影響の評価手法として、同様に菅原のタンクモデルの各段ごとの貯留高(図-10上段グラフ)、合計貯留高(図-10中段グラフ)と孔内水位の比較を行った。図-10下段グラフはBV-3孔の孔内水位とタンクモデル貯留高を片対数表示でなく、通常のグラフ表示で重ね合わせたものである。この最上段のグラフに示されるように、1段目のタンク貯留高は8月11日のものがもっとも高いが、9月22日に最も高い合計貯留高を示すモデルは3段目までの合計貯留高となる。さらに図-10下段のグラフに示されるようにBV-3孔の孔内水位と3段目までのタンク合計貯留高の日変動パターンは概ね相似形を示している。また、この両者は図-11に示されるように相関係数 $R=0.857$ の線形相関性を示している。

3.2.3 地すべり変位速度とタンクモデル合計貯留高

降水量から得られるタンクモデル貯留高は1日単位では図-10下段グラフに示されるように、3段目までの合

図-10 孔内水位-タンクモデル貯留高相関図

Fig. 10 Ground water level and total storage depths in T-Landslide

図-11 T地すべりタンク貯留高-孔内水位相関図

Fig. 11 Total storage depths-Ground water level diagram of T-Landslide

計貯留高では9月22日において最も高く、ついで8月11日、10月27日の順となり、図-6に示される地すべりの変位量の順と一致している。

次いで1日単位で設定されている菅原のタンクモデル諸定数の流出係数、浸透係数を時間単位に換算し、地すべり変位速度とタンクモデル合計貯留高の比較を行った結果を図-12に示す。時間単位のタンクモデルを用いることによって翌日のタンク貯留高には微妙な差が生じるが、降雨の影響は、翌時間には現れることとなる。ここでは1段目のタンク貯留高の要素の影響がもっとも強く現れるため、降雨のピークの直後に現れた地すべり変位速度のピークとタンク合計貯留高のピークは、図-12中段に示されるように、合計貯留高ではいずれもほぼ一致する形となった。図-12下段のグラフに示すように、タンク合計貯留高の対数値 $\log H=1.80$ を越える付近から地すべりは散発的な滑動を示す傾向を見せ、更にタンク合計貯留高の対数値 $\log H=1.90$ を越えると地すべり変位速度とタンク合計貯留高は、図-13に示すようにべき係数5程度のべき乗相関関係を示している¹⁾。

図-12 T地すべり $\log V$ - $\log H$ 比較図

Fig. 12 Correlation between $\log V$ and $\log H$ in T-Landslide

図-13 T地すべり V - H 相関図

Fig. 13 V - H diagram of T-Landslide

3.2.4 孔内水位と地すべり変位速度の1時間単位での相関関係

BV-3の1時間毎の孔内水位と1時間単位の地すべり変位速度の関係を図-14に示す。地すべり変位速度は降雨のピークから1～3時間遅れで明瞭に現れているのに対し、孔内水位のピークは降雨のピークからは5時間以上の遅れを示し、高原状のピークを示した後、なだらかな低下を示している。ここでは孔内水位のピークよりも地すべり変位速度のピークが3時間以上早めに現れている。

タンクモデル合計貯留高が図-12に示されるように地すべり変位速度とほぼ同じピークを示しているのに対し、孔内水位には数時間の遅れが見られる。本来、降雨に伴い、孔内水位などを指標とする間隙水圧が上昇し、有効応力の低下によって地すべりの安定度の低下を招くと考えられているが、ここではこの関係が時間的に逆転して現れている。このような現象が生じる原因には様々な要因が推定される。例えば孔内水位は地すべり地塊における水理地質状況の水平・垂直方向の異方性がある場合、間隙水圧などの地すべりの安定に影響を及ぼす地下水の状態を正確に表現しない場合があると考えられる。一方でこの地区ではタンクモデルの合計貯留高は1日単位、1時間単位のいずれも地すべり変位速度の変化に追従する指標としても有効に機能していた。

4. 地すべり変位速度の1次クリープ的な指数関数的低減現象

4.1 クリープについて

クリープとは物体に一定の応力を作用させているときに、歪みが時間と共に増して行く現象と定義される。歪の経時変化に着目すると、地すべり地に限らず一般的な固体が理想的な弾性体、あるいは粘性体の挙動を示す事は無く、クリープ変形を伴いながら両者の性状を併せ持つ性質を示す。また、瞬間的な破壊を生じるに満たない応力でも、長期間一定の応力が加わると、時間の経過と共に歪みが増大し、ついには破壊に至ることが知られている。この場合、作用する応力レベルによっても異なるが、図-15に代表されるようなクリープ曲線が得られる。一定の応力が作用すると、まず歪速度が時間と共に減少して行く区間が現れ、これを1次クリープとし

図-14 地すべり変位速度-BV-3 孔内水位変動図

Fig. 14 Landslide displacement velocity and BV-3 water level in T-Landslide

ている。ついで、歪速度が一定の区間が現れ、これを2次クリープとしている。さらに歪速度が加速度的に増加し、ついには破壊に至る区間が現れ、これを3次クリープとしている。

4.2 1次クリープ

ここで、1次クリープは「クリープ速度が時間と共に減少し、一定速度あるいは停止に至る現象」と定義される。クリープ現象は金属や高分子化合物などの分野で研究が進み、様々な構成式が提案されている。このような1次クリープ現象を最も単純なレオロジーモデルで代表させようとする、前述した図-2に示されるバネとダッシュポットを並列させたフォークトモデルがまず挙げられる。フォークト物体においては歪を ϵ とすると、スプリングとダッシュポットにおける応力はそれぞれ $\kappa\epsilon$ 及び $\eta\dot{\epsilon}$ となり、それらの応力の和である σ は

$$\sigma = \kappa \cdot \epsilon + \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ϵ : 歪, $\dot{\epsilon}$: 歪速度, κ : 物質定数, η : 粘性率
で現され⁸⁾, $t = 0$ で $\epsilon = 0$ の場合に一定の応力 σ が加えられれば微分方程式(1)の解は

$$\epsilon = (\sigma/\kappa) \{1 - \exp^{-\kappa t/\eta}\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

とされる⁸⁾。したがって歪み速度の時間的变化は

$$\dot{\epsilon} = -\sigma/\kappa \cdot \exp^{-\kappa t/\eta} \quad \dots\dots\dots(3)$$

で表され、歪み速度を対数表示すると

$$\ln \dot{\epsilon} = -\kappa t/\eta \cdot \ln(\sigma/\kappa) \quad \dots\dots\dots(4)$$

となり、歪み速度を対数表示とする時間的な変動グラフでは、負の勾配の直線グラフで表されることとなる。

このように地すべり変位速度が1次クリープ的低減を示す事例についての検討を行う。

4.3 Y地区の事例

4.3.1 地すべり変位速度の変動状況

7月26日の地すべり発生直後より冠頭部に設置した伸縮計の1日単位の観測結果を図-16に示す。観測開始当初は2～3 mm/dの地すべり変位速度を保っていたが、8月3日の時間15mm, 連続雨量16.5 mmの降雨を契機

図-15 クリープ曲線

Fig. 15 Creep curve

に一気に不安定化し、この直後の変位速度は10.6mm/hにまで達した。その後数日は降雨も無く変位速度は一定の割合で徐々に減少していたが、8月9日から10日にかけての連続雨量120mmを契機に再び激しい活動を見せ、時間変位速度は最大70.4mm/h、2日間にわたる変位量は632.4mmに達した。しかしこの後は、豪雨時に大きな活動は示すものの、降雨量に対する変位量の割合は相対的に低下し、また降雨がやんだあとの地すべり変位速度減速の割合は8月3日～9日までに比較し明らかに大きくなった。

4.3.2 地すべり変位速度とタンクモデル貯留高

タンクモデル貯留高と地すべり変位速度の相関性についての検討を行ったところ、菅原のモデルでは良好な相関関係は得られなかったが、短期流出解析に用いられる道土⁹⁾の提示するタンクモデルの1段目のタンク貯留高と地すべり変位速度の間に最も高い相関性が認められた。1時間単位での降水量・地すべり変位速度・1段目のタンク貯留高を図-17に示す。図-17の上段、中断のグラフに示されるように、2、3、4段目と貯留高を加える

図-16 Y地すべり 地盤伸縮変動図
Fig. 16 Precipitation and total displacement in Y-Landslide

図-17 Y地すべり $\log V$ - $\log H$ 比較図1
Fig. 17 Correlation between $\log V$ and $\log H$ in Y-Landslide

ほど、降雨の影響は長時間に及ぶこととなり、地すべり変位速度が急速に変化するY地区では、1段目のタンク貯留高が地すべり変位速度と最も近い変動形態を示していた。道上の示すタンクモデルは3段目までの合計貯留高が土壌雨量指数の算定にも用いられている1時間単位のモデルであり、豪雨に伴う表層崩壊などとの関連が¹⁰⁾指摘されている。1段目の貯留高は降雨に対する変動の割合の最も急速な変化を示す部分であるが、当地区はすべり層厚が比較的薄くかつ急勾配であるためか、表土層の含水量変化の影響を大きく被り、この結果タンクモデルの1段目の貯留高とも高い相関性が得られたのではないかと考えられる。

ここで、地すべり変位速度とタンクモデル貯留高の比率に急激な変化の生じていた8月8日から9日にかけての変動状況を図-18に示す。8月9日の午前2時まで1段目のタンクモデル貯留高と地すべり変位速度は相似的な変動を示していた。しかしこれ以降も5時間にわたって5~10mm/hの降雨が継続し、1段目のタンクモデル貯留高が高原状の高い値を保っているのに対し、地すべり変位速度は一定の割合で急速な指数関数的低減を見せ、8月10日4時にはほぼ停止し、変動パターンには大きな変化が生じている。地すべり変位速度と1段目のタンクモデル貯留高の比率を図-19に示す。8月8日12時~8

図-18 Y地すべり $\log V$ - $\log H$ 比較図2
Fig. 18 Correlation between $\log V$ and $\log H$ in Y-Landslide 2

図-19 Y地すべり 地すべり変位速度($\log V$) / タンクモデル貯留高($\log H$)変動図
Fig. 19 Change of landslide displacement velocity ($\log V$) / Storage of tank model ($\log H$) ratio

月9日2時の間、両者の比率は1～1.3の範囲で推移していたが、8月9日2時以降は一定の割合での規則的な低減を示している。この現象は地すべり末端部に施工されていた抑え盛土工の効果が発揮し始めたことによると考えられる。また、当初は常時0.2～0.4mm/h以上の速度を維持していた地すべり変位速度が、図-17下段のグラフに示されるように、8月9日の1次クリープ的現象以降はタンク貯留高 $\log H=0.7$ 程度を閾値としてこの値以下では顕著な地すべり変動は認められなくなった。なお、急増した地すべり変位速度の低減勾配も明らかに増大している。この間、地すべりブロック末端部の地形に顕著な変化は認められず、抑え盛土による効果が発揮され、この過程では1次クリープ的現象を伴いながら地すべり移動体の強度増加現象が生じていたと考えられる。なお、このような規則的な地すべり変位速度の指数関数的低減傾向は、当地における交通規制解除の判断にあたっての重要な判断指標として用いられた。

5. 考察

5.1 地すべり変位速度の指数関数的低減現象について

地すべり現象は規模の大きな地塊の動きであり、突然動き出し、あるいは停止することはない、この過程では一定の規則性を伴っていると考えられる。一見断続的な変動を見せていると思われる地すべり現象も、停止に至る地すべり変位速度の減速域で顕著な指数関数的低減現象を示していることがある。地すべり変位速度が指数関数的低減を見せる地すべり現象には、降雨による不安定化要因が指数関数的低減現象を示す場合と、フォークトモデルに代表されるような1次クリープ的要因に基づく2種類があると考えられる。

降雨による地すべり変位速度の変動は一般的なタンクモデルの最上段から幾段目かまでの合計貯留高と一定の相関性が認められることがある。このような相関関係が確認される場合、観測される降雨量から逐次、直接得られるタンクモデル貯留高を、地すべりの安定度の指標として用いることが可能となる。すなわち、タンクモデル貯留高の増大時には警戒避難等の発令、低減域には解除の検討の有効な指標として用いることが可能となる。

さらに地すべり変位速度 V とタンクモデル合計貯留高 H の比率 V/H の経時変化に着目することによって、図-4に示されるように3次クリープから崩壊に至る過程、図-18、図-19に示されるような1次クリープを経て停止に至る過程の識別が可能となる場合がある。地すべり変位速度の増大する3次クリープと異なり、1次クリープによる低減現象はタンクモデル貯留高に起因する低減現象と重なり合うため、1次クリープ領域の判断は短期的には困難な場合があるが、指数関数的低減現象が継続している限りは、地すべりは基本的には安定側に向かっていると判断することは可能である。

5.2 レオロジー面からの評価の必要性

地すべりの安定を、すべり面のせん断強度のつりあいに対応するスライダーの要素だけで評価すると、地すべりの形状に大きな変化がなければ、抑え盛土工などの施工が完了した時点で地すべりは即座に停止することとなり、徐々に安定度が上昇して行くような現象を説明することは困難である。このような現象の説明にはフォークトモデルに代表される1次クリープの要素で説明する手法がある。しかし、地すべり現象をレオロジーモデルで表現しようとする場合、すべりせん断抵抗に対応するスライダーの要素を省くことはできない。これを最も単純

図-20-a 1次クリープレオロジーモデル
 Fig. 20-a Primary creep rheology model

図-20-b 2次クリープレオロジーモデル
 Fig. 20-b Secondary creep rheology model

図-20-c 歪硬化レオロジーモデル
 Fig. 20-c Strain hardening rheology model

図-21-a 1次クリープ 歪-時間曲線
 Fig. 21-a Primary creep strain curve

図-21-b 2次クリープ 歪-時間曲線
 Fig. 21-b Secondary creep strain curve

図-21-c 歪硬化モデル 歪-時間曲線
 Fig. 21-c Strain hardening strain curve

な1次クリープ現象を現せば、図-20-aに示されるフォークトモデルにスライダの要素が並列して加わったモデルが考えられる。何らかの要因で差応力 $\sigma = \Sigma T - \Sigma N > 0$ となり、かつ差応力が一定の値を保つ場合には図-21-aに示されるように歪速度は指数関数的低減を示した後に停止するような1次クリープ現象を示すこととなる。次に、図-20-bのようにこの背後にダッシュポットが加わると、差応力 $\sigma > 0$ でかつ一定の値を保つ場合には図-21-bに示されるような2次クリープの挙動を示す。ここでさらに差応力 σ が降雨などの要因によって変動する場合、地すべり移動体がダッシュポットで示されるようにニュートン粘性体の挙動を示せば、歪速度は差応力と線形の比例関係を示すこととなる。図-4の「相関性の高い期間」においてタンク合計貯留高と地すべり変位速度の間に線形の相関関係の認められるS地区はこのような事例であると考えられる。

次に、歪硬化のレオロジーモデルをJ. C. ジェーガー⁹⁾は図-22に示すような緩んだ紐で連結されたスライダのモデルで表現している。Y地区で見られるような降雨などの外力変化の要因を取り除いても地すべり変位速度が指数関数的低減傾向を示す現象は、図-20-cに示されるように更に歪硬化を担うスライダ σ_1 が加わったレオロジーモデルでの説明が考えられる。8月9日の1次クリープ以降はスライダの強度が $\sigma_0 + \sigma_1$ に増加したことによって地すべり活発化の閾値が増加し、1時的な地すべりの停止も生じるようになった。また地すべり変位速度が相対的に低下している現象はダッシュポットの粘性率の増加で説明することも可能である。図-21-cはこのような現象を模式化したものである。しかし、このような地すべり変位速度の規則的な低減現象が、地すべり移動体における単純なバネの要素によるものか、あるいはスライダで表現される部分に一定の比率での強度増加が生じているのではないか、さらにはこれらの複合した他の要因に基づくものではないか、といった疑問が残る。いいかえれば、地すべり移動体のどの領域においてどのようなメカニズムで強度増加が生じているのかを、より具体的な物理モデルで説明することが求められ、さらに事例を加え検討を進める必要がある。同様に差応力と歪速度の関係が比例関係にあるニュートン粘性体の挙動を示すかどうかは、図-13のようなべき乗の相関関係が見られる事例もあり、今後様々な手法により検証を進めて行く必要がある。

図-22 歪硬化モデル
Fig. 22 Strain hardening model

6. まとめ

地すべり現場において地すべり変位速度の変化に一定の規則性が認められる場合、地すべり変位速度は地すべり安定度の一つの指標となる。降雨に起因する地すべり変位速度の変化とタンクモデル合計貯留高の間に一定の相関関係が認められる場合のあることはすでに報告されている¹⁾。本研究ではさらにタンク合計貯留高・孔内水位・地すべり変位速度相互の関係について比較検討を行った。この事例ではそれぞれに一定の相関関係が認められた。タンク合計貯留高は急速な変化を見せる地すべり変位速度にも対応可能な、降雨に起因する地すべり安定度変化の有効な指標となることが確認された。また降雨による要因とは無関係の、一次クリープ的な地すべり変位速度の指数関数的低減現象の存在が確認された。この現象の解明に当たっては、「すべり面強度」の経時の変化について今後検討を進めてゆく必要があると考えられる。

地すべりの安定に関する理論は、地すべり変位速度が何故変化し、またどのようなメカニズムで停止するのかといった動的な側面についても、一般的な物理法則などに基づく合理的な説明が求められる。地すべりは多様な性状を有した規模の大きな移動体の変形現象であり、実験室レベルだけでその実態を把握することは困難なことがある。これらの現象の解明にあたっては、地すべり現場において得られた観測データなどに基づく現象面からのアプローチも重要であり、さらに事例を加え、より詳細な検討が求められる。また、この現象の物理学的な側面からの解明も重要であり、レオロジー面からの定量的な評価も試みる必要があると思われる。

参考文献

- 1) 神原規也 (2002)：タンクモデルを用いた滑動中の地すべり安定度評価，地すべり，Vol. 38, No. 4, pp. 1-9.
- 2) 駒村富士弥 (1967)：地すべり土のレオロジー的特性とその特性にもとづく地すべりの動き方について，地すべり，Vol. 4, No. 2, pp. 10-20.
- 3) 福本安正 (1976)：地すべり粘土のクリープ特性(1)，地すべり，Vol. 13, No. 3, pp. 6-13.
- 4) 藤井弘章 外 (1995)：地すべり挙動の弾粘塑性有限要素解析，地すべり，Vol. 31, No. 4, pp. 1-8.
- 5) 斎藤迪孝 (1968)：第3次クリープによる斜面崩壊時期の予知，地すべり，Vol. 4, No. 3, pp. 1-8.
- 6) 山田剛二・小橋澄治・草野国重 (1971)：高場山トンネルの地すべりによる崩壊，地すべり，Vol. 8, No. 1, pp. 11-24.
- 7) 菅原正巳 (1979)：続・流出解析法，共立出版.
- 8) J. C. ジェーガー (1968)：弾性・破壊・流動論，共立出版，pp. 107-108.
- 9) 道上正規・小島英司 (1981)：集中豪雨による崖崩れの発生予測に関する研究，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 12, pp. 167-178.
- 10) 牧原康隆・平沢正信 (1993)：斜面崩壊危険予測におけるタンクモデルの精度，Journal of Meteorological Research, Vol. 45, No. 2, pp. 35-70.

(原稿受付2003年9月30日，原稿受理2004年3月31日)