

岩盤すべりにおける定常運動から崩壊に至る加速を表現する 質点系ダンパーモデル

Lumped Mass Damper Model to predict the acceleration process of a rockslide
from a steady state movement to the final failure stage

濱崎 英作 丸井 英明 池田 浩二
Eisaku HAMASAKI Hideaki MARUI Kouji IKEDA

山邊 康晴 古谷 元 石川 晴和
Kousei YAMABE Gen FURUYA Haruna ISHIKAWA



日本地すべり学会誌 第56巻 第2号 別刷

岩盤すべりにおける定常運動から崩壊に至る加速を表現する 質点系ダンパーモデル

Lumped Mass Damper Model to predict the acceleration process of a rockslide
from a steady state movement to the final failure stage

濱崎英作^{a) b)*}, 丸井英明^{c)}, 池田浩二^{d)}, 山邊康晴^{e)}, 古谷 元^{f)}, 石川晴和^{a)}

Eisaku HAMASAKI, Hideaki MARUI, Kouji IKEDA, Kousci YAMABE, Gen FURUYA and Haruna ISHIKAWA

Abstract

The Lumped mass damper model (LMDM) is a model to predict the landslide moving velocity, with a clear slip surface including rockslide, in the primary creep to the secondary creep stage of the landslide movement. However, in the current LMDM, when the landslide movement velocity increases, and enter the third order creep stage, the velocity of LMDM deviate from the actual displacement amount step by step. Therefore, in order to solve this problem, we designed a model considering 'reduction of friction coefficient' or 'decrease of Cd' with increasing velocity. As a result, it was found that landslide displacement up to the final failure stage can be predicted. We describe this method and report its physical meaning. In addition we mention to Tank Model on LMDM.

Key words : Lumped mass damper model, Tank model, Rockslide, Displacement velocity, Failure Forecast

和文要旨

質点系ダンパーモデル（LMDM）は、すべり面を有する地すべりの移動速度（1次～2次クリープ段階）を予測するモデルで、不連続面に沿った岩盤のすべり運動も含まれる。但し、現行LMDMでは地すべり移動速度が増加し3次クリープに入る当たりから、実変位量との乖離が生じてしまう。そこで、これを解決するために、速度上昇の際のすべり粘土の摩擦係数の低下、もしくは粘性抵抗係数Cd低下を考慮したモデルを作成した。この結果、最終滑落段階までの地すべり変位を予測することができる事が分かった。ここでは、この手法について解説すると共にその物理的意味について考察する。さらに補助的に用いたタンクモデルについても報告するものである。

キーワード：質点系ダンパーモデル、タンクモデル、岩盤すべり、変位速度、滑落予測

1. はじめに

明確なすべり面を有す岩体や移動体の移動速度を予測し、さらには最終滑落時刻を予想するモデル式の開発は、これらを正しく評価しつつ安全に管理していく上で極めて重要である。

地すべり等の移動体の最終崩落時刻の予想手法としてはクリープモデルである斎藤式¹⁾、福圓式²⁾がある。これらは変位速度を時刻列で収集解析することで滑落を予測するモデルであり、現場での適用事例も多い³⁾。しかしながら、これらの式は斜面形状や物性、地下水上升などを考慮した物理モデルではない。結果として3次クリープの終局段階での適用には安全側の予測モデルとして意義があるものの2次クリープより前までの段階の使用には未だ問題が多い。その後、土屋・大村⁴⁾は斎藤式、福圓式を含め、その時点での斜面崩壊時刻のいくつかの予測式とその力学的特徴について総括した。また林・川邊⁵⁾

は斜面崩壊の加速モデルを摩擦抵抗の減少と粘性抵抗の増大という二つの機構から説明した。式は三つの仮定を設け、3次クリープの最初から崩壊に至るまでの地すべり運動の基本式を導いている。笹原・酒井⁶⁾は崩壊発生前の任意の時刻までの計測データから、「地下水位～地表面変位」の回帰式と「時間～地下水位」の回帰式を作成し、それらを組み合わせて「時間～地表面変位」予測式を作成する方法を提示している。

ところで、前述の斎藤式、福圓式は刻々と変化する移動速度の集積だけで崩壊時間を予測するモデルであるが、本来、予測においては刻々と変化する地下水頭や地すべり地形変化などに対応できることが重要で、これらを考慮した物理則からなるモデル化が予測精度を高めるのに重要である。谷口⁷⁾は地下水位の地すべり移動速度に及ぼす影響について塑性すべりの運動方程式から最終的に地下水位と対応する速度式を導き、2現場事例で地すべり速度と水位の関係を示すノモグラムを示した。しかしながら、論文で示された常数の幾つかについては実験で求める必要があるため本式が実用化されるには至っていない。

近年では降雨や地下水位の変動に関連し移動量・移動速度に着目した論文に榎田ほか⁸⁾、山田ほか⁹⁾、神原¹⁰⁾、紺野ほか¹¹⁾がある。このうち榎田らは、地下水圧の時系列変化を考慮して移動量を予測する単純斜面モデルとして式を展開した。また山田らは地下水位との応答事例を

* 連絡著者/corresponding author

a) (株)アドバンテクノロジー

Advantech Co., Ltd.

〒980-0013 仙台市青葉区花京院1-4-8-1202

1-4-8-1202, Kakyouin, Aobaku, Sendai, Japan

b) (株)三協技術

Sankyou technical engineer Co., Ltd.

c) 新潟大学名誉教授

Professor Emeritus Niigata University

d) (株)東北開発コンサルタント

Tohoku development consultant Co., Ltd.

e) (株)興和

Kowa Co., Ltd.

f) 富山県立大学工学部

Engineering department, Toyama Prefectural University.

集めその変動挙動で幾つかのパターンがあることを示した。神原は4段直列タンクモデルの貯留高さ・孔内水位・移動速度に相関性を認めレオロジー的考察を行うとともに、1次クリープ的な地すべり変位速度の指數関数的低減現象を報告している。さらに紺野らは山形県七五三掛地すべりの水位孔と地すべり変位速度に一次関数モデルで近似可能であることを示した。

他方、濱崎ほか¹²⁾は移動体の移動速度を予測するモデルとして運動方程式を積分して解析式を導いたLMDM(質点系ダンパーモデル)を提唱した。LMDMはすべり層に働くすべり速度(v)に依存して作用する粘性抵抗係数(Cd)を運動方程式に組み入れたモデルである。この手法の最終的な単純式では、榎田らが示す地下水頭の変化による移動速度の予測式と一致する。また式の構成上、紺野らの示す水位に対する変位速度の一次式近似法も結局のところLMDMに帰着する。ただし、LMDMでは、切土、盛土などの刻々と変化する地形変化のケースでも地すべり変動速度を予測できることを示しており、より汎用性の高いモデルとなっている¹³⁾¹⁴⁾。また、ここではLMDMを用いて様々なケースの16事例を解析した結果、限界歪みに達する前や2次クリープ段階までの地すべりにおいて、多くの事例で地すべりの移動観測結果とモデルの良好な再現が認められていることを報告している。しかしながら、一方で崩壊まで達する事例の多くでは、ある速度段階を超えて速度が大きくなるとモデル変位速度と実変位速度は乖離しあじめることを報告している¹³⁾。そこで、今回、ある岩盤斜面を再現例として、実変位に対して崩壊まで乖離せずに追随させることを目標に、LMDMに改良を加えた。つまり Cd もしくは内部摩擦角(ϕ)についてある限界速度を超えた際に低減する関数系(低減率とする)を作成した結果、崩壊した風化岩盤すべり事例の一つで良好な応答変位が認められたのでここに報告するものである。なお、崩壊するような事例の多くは水位観測孔などが無いことが多い。今回の事例解析もその一つで、それを補うため、ここでは降雨応答する直列三段タンクモデルで水頭を模した。

2. モデル化

2.1 LMDMの基礎式

LMDMはフェレニウスやRBSMを用いた簡易3次元安定解析モデル¹⁵⁾などの安定計算式から得られる時系列のせん断抵抗力(R)と滑動力(D)と、さらにはすべり層に作用するダッシュボット型の制動ダンパー(k)をもとに刻々と変化する地すべり変位速度(v)と変位量(X)を運動方程式(図-1)から求めたもので最終的に変位速度(v)は式(1)で表される¹²⁾。

$$v = \frac{F}{A \cdot Cd} \left(1 - e^{-\frac{A \cdot Cd}{m} t}\right) \quad (1)$$

ここで v : 地すべり移動速度, F : 超過滑動力 (= $D - R$)

$-R$), Cd : 粘性抵抗係数, A : すべり面面積, m : 質量, t : 時間である。また, F にかかる D, R は以下の通りである。

$$D = mg \sin \theta : \text{滑動力} \quad (2)$$

$$R = \tan \phi (mg \cos \theta - u) + cA : \text{抵抗力} \quad (3)$$

ここに, u : 間隙水圧, c : 粘着力, ϕ : 内部摩擦角, g : 重力加速度, θ : すべり面傾斜角, である。

ここで $e^{\frac{A \cdot Cd}{m} t}$ は極短時間で0に至るため結果的に簡単な式(4)を用いることができる。

$$v \approx \frac{F}{A \cdot Cd} \quad (4)$$

式(4)は“ $A \cdot Cd$ が一定の場合、地すべり移動速度 v は超過滑動力 F に比例して増減する”という意味を持つ。濱崎・丸井ほかはこれをクロアチア国のコスタニエック地すべり(Kostanjek landslide)に適用した結果、観測期間中の地すべり移動量について良い再現結果を得た¹²⁾。しかしながら、崩壊にまで至る地すべり事例では $A \cdot Cd$ 一定条件では、速度がある段階を越えるとモデル変位速度 v と実変位速度 v は乖離することがわかった。

2.2 モデルの改良

この乖離については、実際に崩壊に至った幾つかのLMDM解析事例で示されている¹³⁾。例えば、図-2長野地附山崩壊事例を見ると、1984年7月10日段階までは地すべり移動観測値をLMDM解析値がトレースできるが、それ以降は実変位が速度を増しLMDMの解析による移動速度のはぼ2倍のスピードで推移するのが分かる。すなわち、ある速度を超えるとLMDM解析速度が実際変位速度に対して小さくなってしまう。従来までのLMDMでは、変化するのは水位変化などに基づく超過滑動力(F)のみであって、摩擦強度(ϕ)と粘性抵抗係数(Cd)は変化しない。このため、3次クリープに至って滑落するほどの速度増大には適応できない。

そこで、改良LMDMにおいてはある一定速度を超えて

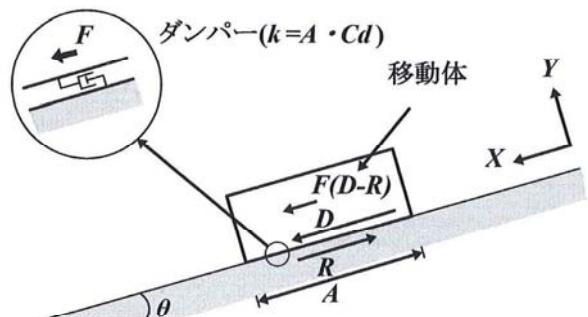


図-1 ダンパーを有す地すべりの運動モデル¹²⁾

Fig. 1 Kinematic diagram of a landslide body with the damper¹²⁾

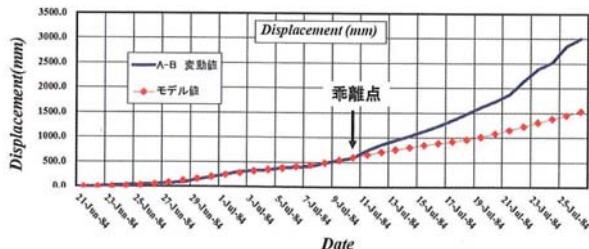


図-2 LMDMによる地附山地すべりの移動量解析^[13]
実線：観測変位，破線：解析値

Fig. 2 Analysis of the displacement of Jitsukiyama¹³⁾
 Solid-line: Observation, Dot-line: Simulation
 Landslide by LMDM

た値から速度 (v) に対する低減を考慮し ϕ と C_d のそれぞれについて低減率 (drp と drc : 0 ~ 1) を設定した。すなわち、次に示す 2 パターン(5)(6)式を考慮した。

パターン1 : $\phi = drp(v) \cdot \phi_0$ (5)

パターン2 : $Cd = drc(v) \cdot Cd_0$ (6)

ここで、 ϕ_0 は安定計算で用いている摩擦強度初期値であり、 Cd_0 は乖離する前の安定した粘性抵抗係数の初期値である。このとき変数として使用する速度(v)は、計算時点の速度ではなく、ある程度遡ったところまでの各観測速度の平均をもとに得られる移動平均速度を用いた。というのも伸縮計で計測される移動速度は、短い時間単位で見ると移動体自体や観測計器の機械的摩擦などに伴ったスティックスリップ現象等で断続的な変位を示すことがある。そこで、これを移動平均などで平均化すれば滑らかな値を得ることができるため、解析上得策と判断した。

2.3 タンクモデル

突然滑動を始め、緊急を要する事態に陥った地すべりでは地内に観測水位孔を設置することが不可能な場合もある。したがって、LMDM解析のためには予想する地下水頭を実効雨量法やタンクモデル法などで降雨から求めることが必要となる。再現解析では、降雨応答の直列3段タンクモデルを用いることとし、最下位タンク内の水位変化を想定有効空隙率 (ϕ_e) で除することですべり面に作用する水頭として計算することとした。

3. モデル検証

3.1 適用現場概要

図-3に解析適用地の平面図を示す。また図-4に当該地区の降水量と地盤伸縮データを示す。当該地の風化岩盤の地すべりは7月初旬～中旬の雨と台風の大雨に伴って7月15日夕方に滑落した。滑落直後の移動土塊は最大幅約250m、最大長さ約300m、比高が最大30mに達する滑落崖を有し、被災した市道の両端部では約15mの段差が生じた。土塊は概ね一体となって移動したため、

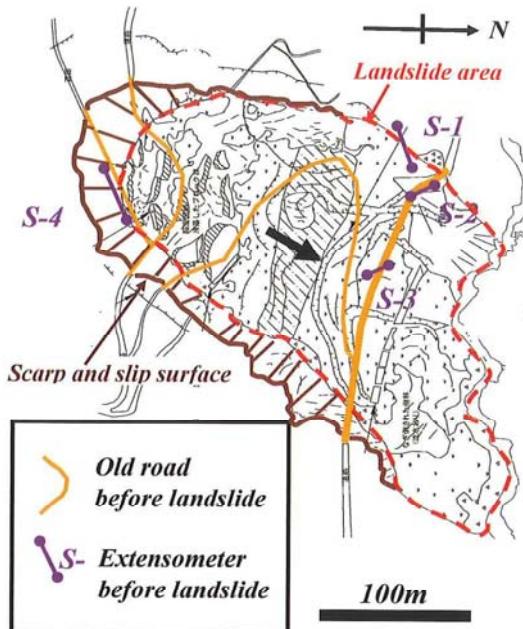


図-3 解析適用した地すべりの平面図¹³⁾
 Fig. 3 Map of landslides area for LMDM analysis¹³⁾

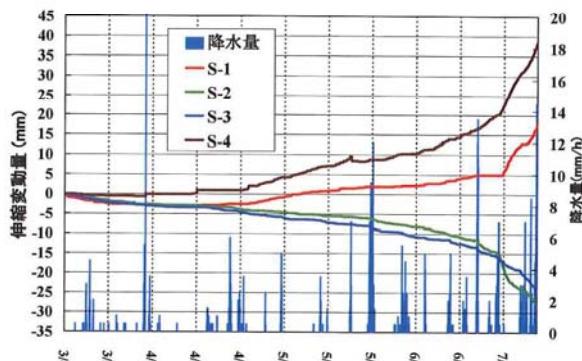


図-4 対象地の降水量と地盤伸縮変動の関係¹³⁾
 Fig. 4 Relationship between precipitation and ground displacement by extensometer of the landslide¹³⁾

水平移動距離が30mを超えていてもかかわらず、市道の道路線形はほぼ原形を留めていた。地質は第三紀中新世から鮮新世にかけての砂岩泥岩互層、軽石質塊状あるいは一部砂質層状となる凝灰岩が分布するところである。砂岩泥岩互層はやや凝灰質で、末端河川の河床にほぼ連続して分布しており、地すべり地周辺では概ね北ないし北東傾斜（約20°）の流れ盤構造となる。

当該地すべりは発生の5ヶ月前に亀裂や段差等の現象が確認され、亀裂箇所に4基の伸縮計と雨量計を設置し時間毎のデータが取得されていた。また、ここでは早期の地すべり監視体制の確立と安全確保を最優先としたためボーリング調査、水位観測は行なわれていなかった¹³⁾。

3.2 適用現場のモデル化

3.2.1 LMDMモデル

変動解析にあたり、図-4の伸縮計データの内、崩落

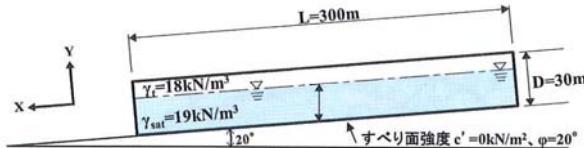


図-5 解析地すべりのLMDM解析諸元¹³⁾
Fig. 5 Analysis model profile of landslide by LMDM¹³⁾

直前までのデータがある斜面中腹のS-3の圧縮伸縮変動を再現対象とした。また、地すべり構造として矩形単純斜面モデル（質点系モデル）¹²⁾で計算した。矩形単純斜面モデルを採用する理由として、現場では滑落するまで地すべりの地質情報がなかったことが挙げられる。おそらく今後考えられる将来の類似なLMDM適用事例でも、地すべり調査が進んでない状況での解析が多いと予想されるので、この手法は実際的な解析手法といえる。

図-5に当該地区でのLMDM解析諸元をまとめる。すべり面勾配は滑動前の斜面平均勾配を採用し20°とした。長さ(L)300mとし平均層厚(D)は、濱崎ほか¹⁵⁾や上野¹⁶⁾の研究を参考に幅250mの約1/8とし30mを与えた。

3.2.2 直列3段タンクモデルによる水位再現

3段直列タンクの排出孔の位置(h:高さmm)と流出係数(d)の値について図-6に示す。当時、雨量計が現地に設置されており時間毎の雨量(mm)が得られている。これが最上段タンクに入り、最終的に最下段タンクが安定解析に用いられるタンク貯留量となる。モデルでは最下段タンクの底をすべり面（基準水面）とし地すべりの臨界平衡状態($F_s \approx 1.0$)を観測グラフから4月16日の12時とした。このときの水位(0.053m)を安定解析から逆算しタンク貯留量(1.057mm:有効空隙率 $\phi_e = 0.02$)として与えた¹⁷⁾。

3.2.3 低減前のLMDM結果

まずは、 ϕ 値、 Cd 値を低減せずに従来のままのLMDMによる解析結果を図-7に示す。ここで初期の Cd 値は $Cd_0 = 0.66 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{sec}/\text{m}^3$ とした。図の下段にはタンクモデルの計算水位と降水量を、中段にはS-3移動量から求めた日速度(v)と計算によって得られた解析速度を入れた。また、上段には実移動量とモデル解析の移動量を示した。

図から、6月21日の大雨(26mm/24時間)以前までは実測と予測モデルはほぼ近似しているのがわかる。

しかしそれ以降、徐々に実測の移動量が増大しモデル値と乖離する。特

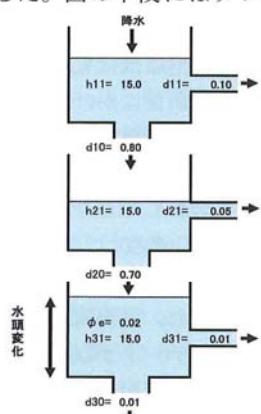


図-6 対象地タンクモデル¹³⁾
Fig. 6 Tank model for estimation of groundwater level.¹³⁾

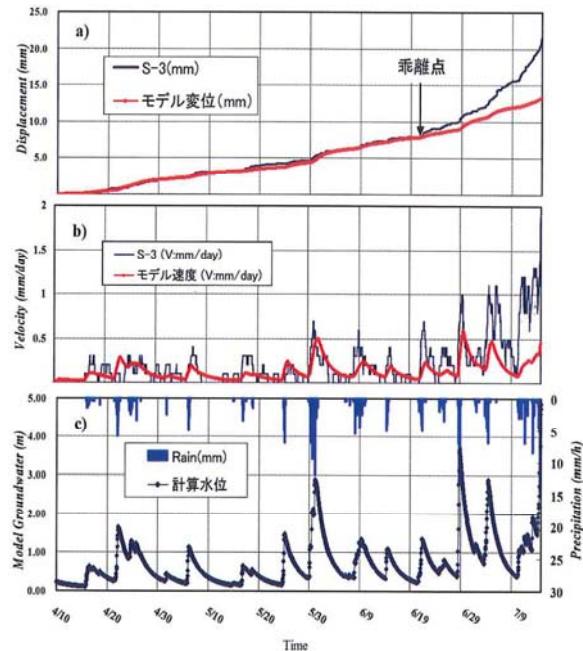


図-7 当該地区的LMDM解析結果¹³⁾
a) は変位、b) は速度を示す。a) b) 共にS-3観測データと解析値を対比。c) はタンクモデル水位と降雨。

Fig. 7 Result of LMDM analysis of the landslide¹³⁾
a) Displacement, b) Velocity. Observed data and simulated values are compared in both diagrams,
c) Tank model groundwater level and precipitation.

に6月29日～30日の大雨(73.5mm/13時間)以降は徐々に乖離の度合いが増大し、途中緩和するも結局7月14日～15日の台風(84mm/21時間)によって再度加速し7/15の滑落に至っている。滑落直前のモデルと実測値の乖離幅はおよそ8mmとなっている。

3.2.4 低減率(drp , drc)の速度依存

速度に依存する ϕ 値、 Cd 値の低減率(drp , drc)の範囲は0～1とした。“1”は ϕ や Cd が元々の ϕ_0 値、 Cd_0 値を示し“0”は速度が無限大となることを意味する。変数となる速度を設定するに当たり、ここでは実時間速度の移動平均時間を24時間に設定し日当たりの移動平均値との関係式にした。最適化の結果として得られた低減率は図-8に示す通りで図の上段が ϕ の drp を示し図の下段が Cd の drc を示す。

図-8の上段 ϕ と下段 Cd を比較すると、ともに24時間移動平均速度の $v = 0.3 \text{ mm/day}$ あたりまで dr が1.0で推移するが、それを超えると ϕ 低減率(drp)は速度増加に伴って徐々に増加していく。他方 Cd 低減率(drc)は 0.3 mm/day から 0.9 mm/day に至るまでのわずかな速度増加で0.3まで急激な低減を示し、それ以降は速度増加量と比例せず段階的に低減率を減少させている。

3.3 解析結果

図-8に示す最適化された低減率を用いて解析した当該地すべりにおける崩落までの再現結果を図-9、図-10

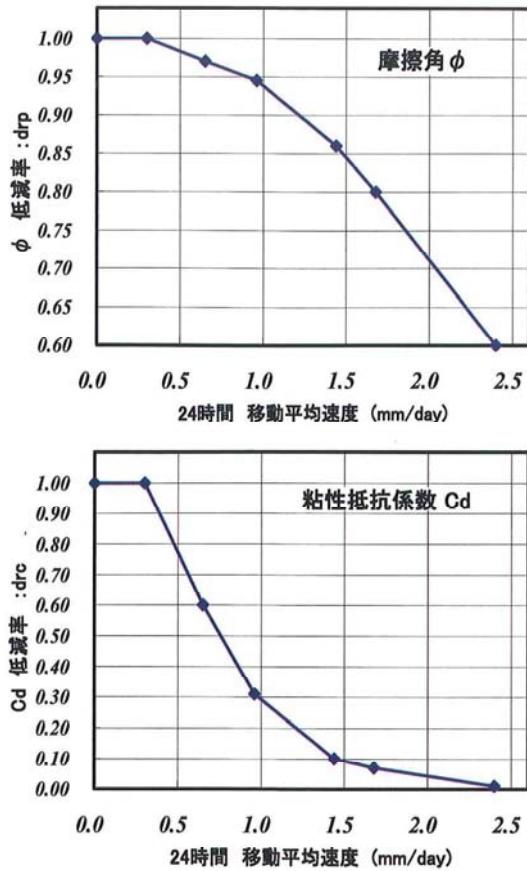


図-8 低減率と24時間移動平均速度との関係

Fig. 8 Relation between reduction ratio and 24 hour moving average velocity

に示す。図-9は ϕ 低減による再現で、他方、図-10は Cd の低減による再現である。いずれも図-7の最下段に示すタンクモデル解析から求めた水位を同じく採用し計算している。図-9, 10の下段は24時間移動平均速度でのS-3実測（青線）とLMDM計算値（モデル2：赤線）との比較で、上段は変位量での比較である。なお、図の上段にはモデル1として低減を考慮しないパターン（緑線）も入れた。

解析の結果、変位量で見ると ϕ 低減、 Cd 低減のそれぞれでほぼ最終崩壊まで再現できた。他方、24時間移動平均速度の比較では ϕ 低減ケースが実測値よりやや下目に推移するものの Cd はやや上目で推移した。なお計算モデルと実測の移動量における最小二乗誤差平均(RMSE)は ϕ 低減が0.317mm、 Cd 低減が0.304mmで、両者ともに再現性が優れていることがわかる。

4. 考察と将来展望

4.1 ϕ 低減の物理的意味

図-11には時間毎に変化する実測速度の24時間移動平均値を棒グラフに、また、それによって低減される ϕ 値を折れ線グラフで示す。この図から ϕ は20°から最小15°付近まで低下するがその間、強度低下と回復が頻繁に行

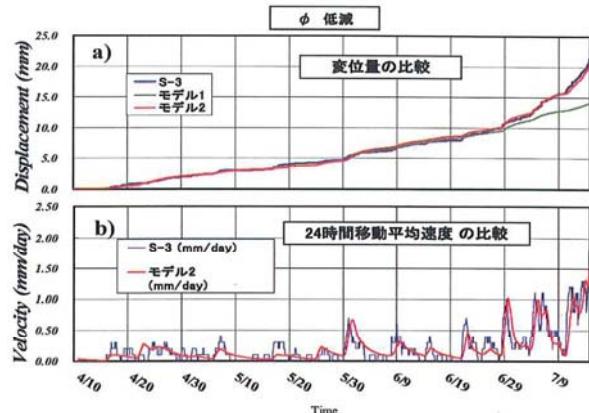


図-9 ϕ 低減による変位量(a)と24時間移動平均速度(b)の再現 注: 青線は伸縮計S-3による観測値、緑線はモデル1(原型)、赤線はモデル2(ϕ 低減)

Fig. 9 Reproduction of a) landslide displacement and b) 24hours average velocity using ϕ reduction.
Blue line: Observed data by extensometer S-3.
Green line: Simulated values by model 1 (original model)
Red line: Simulated values by model 2 (using ϕ reduction)

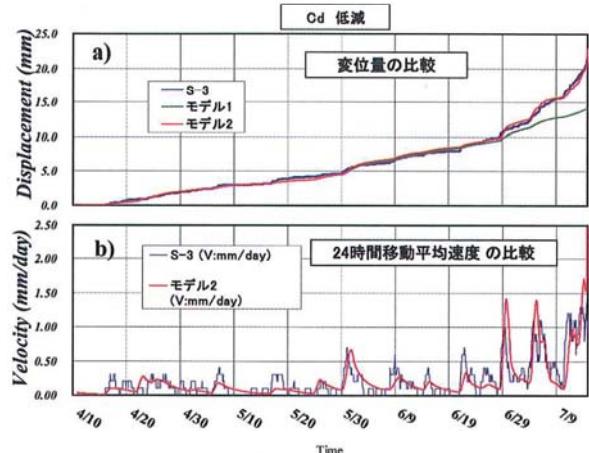


図-10 Cd 低減による変位量(a)と24時間移動平均速度(b)の再現 注: 青線は伸縮計S-3による観測値、緑線はモデル1(原型)、赤線はモデル2(Cd 低減)

Fig. 10 Reproduction of a) landslide displacement and b) 24 hours average velocity using Cd reduction.
Blue line: Observed data by extensometer S-3.
Green line: Simulated values by model 1 (original model)
Red line: Simulated values by model 2 (using Cd reduction)

われることとなる。 ϕ は繰り返せん断を行うことでピーク強度から残留強度にまで低下する。また地すべり粘土の残留強度も軟化強度まで回復しえることはよく知られている。しかしながら、このような短期間の速度変化が繰り返される中で強度低下と回復が即応して起こりえるのか、について問題が残る。また、一般的にはエネルギーの摩擦減衰は距離の積と言われていることからも

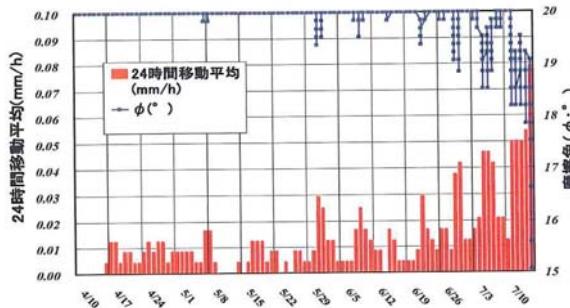


図-11 24時間移動平均速度による ϕ 低減の再現
Fig. 11 Reproduction of ϕ reduction by 24 hour moving average velocity

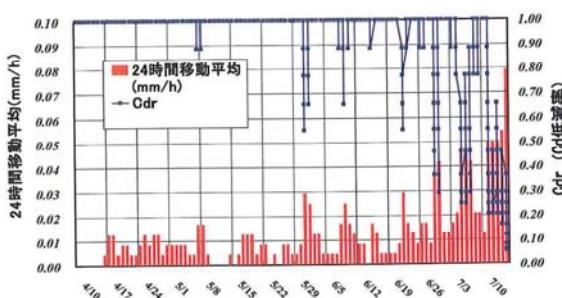


図-12 24時間移動平均速度によるCd低減率の再現
Fig. 12 Reproduction of Cd reduction ratio by 24 hour moving average velocity

摩擦係数が速度に依存して変化するという考えは支持されにくいといえる。

4.2 Cd低減の物理的意味

同様に、図-12には時間毎に変化する実測速度の24時間移動平均値棒グラフと、それを再現して得られたCd値の低減率を折れ線グラフで示した。この図から、Cdの低減率は1.0から滑落直前には0.1を下回るところまで低下する。またその間、24時間移動平均速度に反比例し、Cd値の回復が何度も繰り返されながら段階的にその値が小さくなる傾向が認められる。

なお、図-13に示すような粘性流動のニュートン式は $F = \eta AU/h$ (U : 変位速度, h : 変位層厚み) である¹⁸⁾。他方LMDMでは、 $v \approx F/CdA$ であり、 $U = v$ とし、粘度(η)を粘性抵抗係数Cdと h の積とする両式は一致する。すなわち、変位速度はすべり変位層の粘度が地すべりの挙動を制御しているといえ、ニュートン流動を示す。他方、嵯峨ほか¹⁹⁾は膨潤性粘土であるモンモリロナイトの懸濁液が高いチキソトロピー（揺変性）を示すこと、および懸濁液の濃度に依ってその挙動が変化することを実験的に示した。

チキソトロピーとは力が大きいとき粘性を低下させ、力が解放されると粘度が増していく現象である。多くの地すべり粘土ではスマクタイト(=モンモリロナイト)が支配的であることも知られており、図-11の現象も非ニュートン流動のときのチキソトロピーとしての振る舞いの結果、という仮説は極めて魅力的である。すなわち、

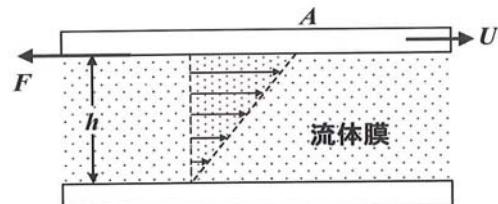


図-13 粘性流動の剪断力(F)と速度(U)の模式図¹⁸⁾
Fig. 13 Schematic diagram of shear force (F) and velocity (U) for viscous flow¹⁸⁾

ある一定以下の速度では、粘度がせん断速度に依存しないニュートン流動を示し、ここまでは通常のLMDMで解析されるものの、ある一定以上の速度に至ると非ニュートン流動を示し、せん断速度に対しCdが低減して移動速度がより加速する、との仮説ができる。

4.3 移動平均速度の利用

伸縮計などで測定されて集積される観測値には、測定器の分解能の問題、測定器自身やすべり面内でのステップスリップ現象などの数々の問題がある。

図-14, 15はクロアチア国地すべりの変動をLMDMで解析したときのもの¹²⁾で、図-14が日変位速度の実測値(Obs. velocity)と解析値(Sim. velocity)の比較、図-15が10日平均速度でのそれぞれの比較である。図から、日変位の比較では決定係数は0.3454、10日平均移動速度では決定係数が0.7167となり、明らかに移動平均した場合の決定係数が高い。また滑らかに変動しているのが分かる。したがって、低減率を求める際は速度を移動平均化して断続運動等を平滑化しつつ次の低減率を予想するほうが安定的な解析を行えると考える。

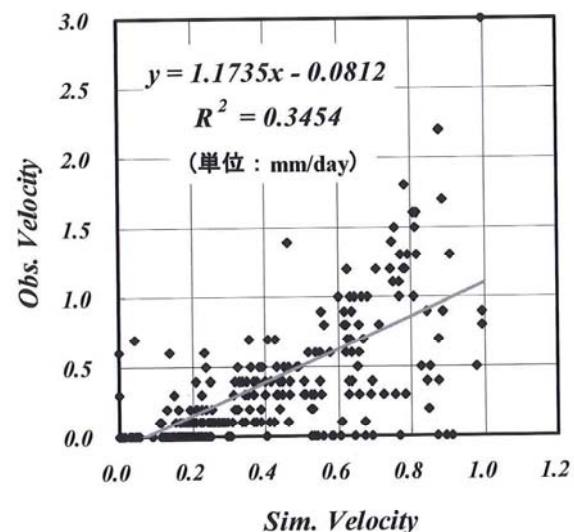


図-14 日変位速度の実測値(Obs. velocity)と解析値(Sim. velocity)の比較
Fig. 14 Comparison between observed velocity and Simulated velocity for a day moving average velocity

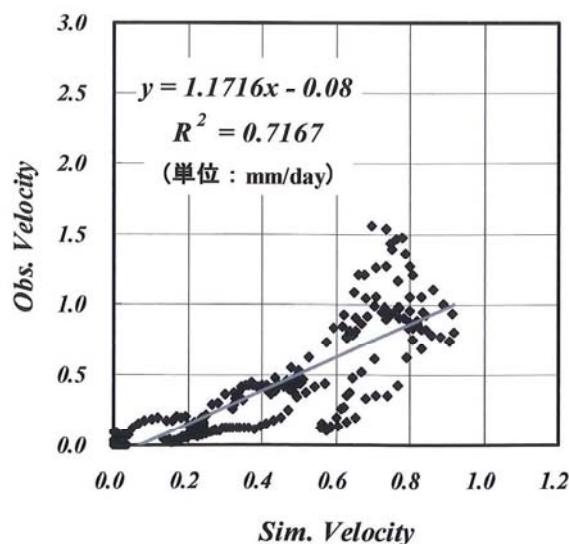


図-15 10日移動平均速度の実測値（Obs. velocity）と解析値（Sim. velocity）の比較

Fig. 15 Comparison between observed velocity and Simulated velocity for 10-days moving average moving average velocity

4.4 タンクモデル

通常の地すべり地にあるべきボーリング水位孔も緊急を要する地すべりでは設置時間が無いときや、現地立入の制限で設置が叶わないこともある。また地すべり変動は降雨に応答して追随するものの観測水位に対してうまく連動するとは限らない。その際は、むしろ実効雨量やタンクモデルによって降雨応答モデルを作るほうが得策である。当該解析適用地は、水位孔がもともと無い現場であったが地盤伸縮計とともに雨量計を設置することができ、これらの観測値を詳細に取得できた。地すべり地の多くが、およそ1～3段までの直列タンクモデルを用いることで水位変動を追跡することが可能で、1段モデルは実効雨量と同等である。なお、タンクモデルでは蒸発散を考慮することもあるが当該事例では考慮していない。緊急の場合は雨が多いことも多いので、多くはこれを考慮する必要性は小さいと判断する。

4.5 将来の研究展望

LMDMは基本的にすべり面変位層におけるニュートン粘性流動を考慮したダッシュボット型のクリープモデルである。これに、ある一定速度を超えたときに ϕ もしくは C_d を低減させることで、崩壊までのトレースが可能であることが示された。ここで、 C_d の低減が妥当であるならば、非ニュートン流動のときのチキソトロピー効果である可能性が高い。これらについては、実験や他現場での確認と検証が待たれる。さらには、今後、崩壊予測としての実用化のためには、 ϕ もしくは C_d の低減が始まる移動速度の変化点についての事例収集解析が重要である。杉井ほか²⁰⁾は地すべりのひずみ速度とひずみの関係をグラフ化し崩壊事例での加速点の閾値（切迫性評

価のための加速点）を示している。これと同様に ϕ もしくは C_d の低減の開始点が崩壊の切迫性評価の閾値として利用できる可能性があると考える。つまり ϕ もしくは C_d の低減が始まると同時に最初の崩壊予兆点となるのではないだろうか。これらについては地すべりの岩質、すべり面形状、斜面勾配などで異なる可能性があるので、事例を収集して検討を加えることが重要と考える。

なお、タンクモデル併用の場合、警戒すべき最大降水量などが気象予報等で示された場合、今回提案した予測モデルにこれを入れることで、最悪シナリオとしての予測ひずみ速度も得られる。その場合、杉井ら²⁰⁾の示すグラフにそのひずみ速度を重ねることで、切迫性の把握がより分かりやすく示されるものと期待している。

5.まとめ

今回の、研究成果を以下にまとめた。

- ・LMDMに改良を加え ϕ もしくは C_d について、ある速度を超過した際に、それ以降の速度増加に対応して低減する低減率（関数系）を作成した。この結果、風化岩盤斜面の滑落事例の一つで崩壊直前までの良好な応答変位を得られた。

- ・本モデルは、すべり面を有する斜面の物理特性を応用したもので斎藤モデルや福圓モデルなどの時系列の移動速度を式に当てはめたモデル式とは異なる。

- ・ ϕ 低減と C_d 低減では、速度に応答する低減率の変動傾向が異なる。 ϕ 低減は初期では小さく速度が大きくなると次第に低減率が増える。他方 C_d 低減は最初に大きく低減するものの、ある程度以降になると速度増加と共に徐々に低減率が低下する。

- ・今回、低減率について物理的な意味を考察したが、現段階では確証は得られていないものの、チキソトロピックな作用としての C_d 低減がより合理性が高いと考える。

- ・低減率を決定する観測速度は、スティックスリップなどの断続運動や計器誤差を除去することが可能な移動平均速度を使用するべきである。

- ・事例では、降雨応答タンクモデルを使って地すべり安定解析上の間隙水頭を模して代用した。ただし適切な観測水位孔があればこれを併用するのも良策である。

- ・本論では、風化岩盤すべりでの事例適用を示したが、基本的にすべり面を有する斜面の移動解析で広く適用可能なモデルとなり得るものである。

- ・崩壊予測もしくは崩壊までの切迫性把握²⁰⁾については今後の事例収集が欠かせない。また、 ϕ 低減が優位であるか、もしくは C_d 低減が優位であるか、もしくはこれらの併用なのかは実験や事例収集などの研究が必要で、今後ともこの研究を進めていきたい。

謝辞

本研究のきっかけを与えて頂いた地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）の「2008～2012

クロアチア土砂・洪水災害軽減基本計画構築」に参画された全ての皆様に深い感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 齋藤迪孝 (1987) : 斜面崩壊時刻予測のためのクリープ曲線の適用について, 地すべり, Vol. 24, No. 1, pp. 30–38.
- 2) 福圓輝旗 (1990) : 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, 46, pp. 45–81.
- 3) 木村隆俊・横山昇 (2006) : 現場で役に立つ地すべり工学 第8回 4.2崩壊予測と適用例, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 3, pp. 44–51.
- 4) 土屋智・大村寛 (1988) : 斜面崩壊時刻の予測式とその力学的特徴に関する考察, 地すべり, Vol. 25, No. 2, pp. 2–8.
- 5) 林拙郎・川邊洋 (1995) : 斜面崩壊に至るスライドの加速モデル, 地すべり, vol. 32, No. 2, pp. 10–16
- 6) 笹原克夫・酒井直樹 (2014) : 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測, 地盤工学ジャーナル, Vol. 9, No. 4, pp. 671–685.
- 7) 谷口敏雄 (1957) : 地下水位の地すべり移動速度に及ぼす影響について, 土木学会論文集, No. 46, pp. 39–45.
- 8) 梶田充哉・市川仁士・大宅康平 (1994) : 地下水位と移動量の関係に基づく地すべりの移動特性とモデル解析, 地すべり, vol. 31, No. 2, pp. 1–8.
- 9) 山田正雄・山崎勉・山崎孝成 (2000) : 地下水流動と地すべり変動の特徴について, 地すべり, Vol. 36, No. 4, pp. 22–31.
- 10) 神原規也 (2004) : 地すべり変位速度の指數関数の低減現象, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 28–36.
- 11) 紺野道昭・吉迫宏・井上敬資・正田大輔・中里裕臣 (2018) : 地下水位と地すべり変位速度の関係の一次関数モデルー山形県七五三掛地区の事例ー, 日本地すべり学会誌, Vol. 55, No. 2, pp. 8–14.
- 12) 濱崎英作・丸井英明・吉松弘行・加藤猛士・古谷元・王純祥 (2016) : 地すべり移動速度を予測するためのダンバー質点系モデル, 日本地すべり学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 12–17.
- 13) 濱崎英作・丸井英明・古谷元 (2017) : 質点系ダンバーモデル (LMDM) による地すべり変位量予測法－解析手法と事例－, 新潟大学災害科学復興研究所 流域保全学研究部門年報, 第3号 (2016), pp. 213–316.
- 14) Hamasaki, E., Marui, H. & Furuya, G. (2017) : Simulation model to predict landslide speed using velocity-dependent viscous damping. Proceedings of the 4 th World Landslide Forum, Ljubljana, Slovenia, May 29 – June 2, 2017, pp. 579 – 586.
- 15) 濱崎英作・竹内則雄・大西有三 (2006) : 三次元斜面安定問題に対する簡易離散化極限解析法の開発, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 5, pp. 9–17.
- 16) 上野将司 (2001) : 地すべりの形状と規模を規制する地形/地質要因の検討, 地すべり, Vol. 38, No. 2, pp. 1–10.
- 17) Anderson.M.P. & Woessner.W.W.(1992) : Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport, ACADEMIC PRESS, INC (日本語訳版, 地下水モデル－実践的シミュレーションの基礎, 藤繩克之監訳, 共立出版, 246p)
- 18) 曾田範宗 (1971) : 摩擦の話, 岩波書店, 214p.
- 19) 嵯峨美由紀・石川奈緒・藤井克己・藤崎浩幸 (2001) : モンモリロナイト懸濁液の流動特性の塩濃度依存性, 農業土木学会論文集第212号 (Vol. 69, No. 2), pp. 23–30.
- 20) 杉井良平・西井稟子・石井靖雄 (2017) : 地すべりのひずみ及びひずみ速度の経時変化による崩壊の切迫性評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 54, No. 6, pp. 11–18.

(原稿受付2018年8月2日, 原稿受理2019年1月24日)