

# 地すべり移動速度を予測するためのダンパー質点系モデル

## Lumped mass damper model to predict landslide velocity

濱崎英作<sup>a) b) \*</sup>, 丸井英明<sup>c)</sup>, 吉松弘行<sup>d)</sup>, 加藤猛士<sup>d)</sup>, 古谷 元<sup>e)</sup>, 王 純祥<sup>c)</sup>

Eisaku HAMASAKI, Hideaki MARUI, Hiroyuki YOSHIMATSU, Takeshi KATO, Gen FURUYA and Chunxiang WANG

### Abstract

In order to predict the landslide velocity, mass system model composed of damper is an effective method which is based on kinematic equations. Furthermore it is finally deduced by this method that downward forces ( $F$ ) have close linear relationship to velocities ( $v$ ). Therefore, velocities ( $v$ ) of landslides increase in response to increasing downward forces ( $F$ ). The analytical result using this technique to the Kostanjek landslide in Croatia clarified that this mass system model is effective to reproduce the variation of landslide velocity in response to the variation of groundwater level.

**Key words :** Landslide, Displacement Velocity, Damper, Slope Stability Analysis, Mass system model

### 和文要旨

運動方程式に基づくダンパー質点系モデルは地すべり速度を予測するため有効な方法であることがわかった。また、この式は最終的に下向きの力 ( $F$ ) と速度 ( $v$ ) が密接な比例関係にあることを示す。すなわち地すべり速度 ( $v$ ) は下方力 ( $F$ ) の増加に応じて増加する。この技術を用いてクロアチアのKostanjek地すべりに適用した結果、地下水位の変化に応じて速度が再現され有効であることが認められた。

キーワード：地すべり、変位速度、ダンパー、斜面安定解析、質点系モデル

## 1. はじめに

地すべり解析のなかでも地すべりの変位速度を予測する物理モデル式の開発は近年の重要課題の一つである。若井・吉松 (2013) は、地すべりの数値解析手法の現状と展望のなかで、今後の技術的課題の一つに活動の停止状態を含めて種々の地すべり様式を高精度に解析するため地すべり地塊の推力と抵抗力及び内部散逸応力を表現する支配方程式の開発導入が不可欠であることを述べている。地すべり学草創期、谷口 (1957) 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、検討過程で示された常数の幾つか (例えば粘着力と内部応力の比例関係数 $f$ ) は実験で求める必要があり本式が実用化されるには至っていない。FEMなどの数値解析式でも弾粘塑性モデル等による速度再現に関する幾つかの報告がある (藤井ほか (1995), Ishii *et al.* (2011))。このうち藤井ら (1995) は速度ひずみが弾性ひずみ速度と粘塑性ひずみ速度の和によって得られるものとし、表した粘塑性ひずみ速度式中の流動性パラメーター ( $\gamma$ : day<sup>-1</sup>) の重要性を述べた。ただし $\gamma$ が持つすべり内での物理的意味や試験方法が明確ではなく本モデルが未だ一般化され使用されるには

至っていない。一方、地すべりの滑落に関する予想式では斉藤 (1987), 福囿 (1990) による式などがある。これらは地すべり変位速度を時刻列で収集し解析することで滑落時間を予想するモデル式であり現場での適用事例も多い (木村・横山, 2006)。しかし、これらは斜面形状や物性を基に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次クリープ前段階での使用には未だ問題が多い。また、多くの地すべり地内観測データから地下水と移動速度の関係性に着目した報告に榎田ほか (1994), 神原 (2004) などがある。前者の報告では統計的に地下水位の移動平均と移動量に高い相関を認め、そこから単純斜面での粘弾性モデルを考えて地下水位と地すべり運動量を簡易的に計算モデル化している。なお、統計上の寄与率などから弾性係数の効果が小さいことを述べていることは注目すべき点である。後者では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数関数的低減現象を報告している。

このように、これまで地すべり運動速度を表現するための計算手法に関し多くの報告があるが、いまだ決定的なモデルとして認知されていないことも事実である。

本論文では、地すべりの移動現象を簡単に理解するため質点系モデルを用いる。これは使用頻度の高い安定解析と直にリンクできる点でメリットが大きい。以上から質点系モデルの運動方程式を構築する前提として安定解析のせん断抵抗力 ( $R$ : Resistant Force) と滑動力 ( $D$ : Driving Force) に着目する。ここで、斜面安全率 ( $Fs$ ) は  $R/D$  である。このとき、運動方程式の前提となる

\* 連絡著者 / corresponding author

a) (株)アドバンテックテクノロジー  
Advantech Co., Ltd.  
〒980-0013 仙台市青葉区花京院1-4-8-1202  
1-4-8-1202, Kakyoin, Aobaku, Sendai, Japan

b) (株)三協技術  
Sankyotek technical engineer Co., Ltd.

c) 新潟大学災害・復興科学研究所  
Research Institute for Natural Hazards & Disaster Recovery, Niigata University.

d) 川崎地質株式会社  
Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.

e) 富山県立大学工学部  
Engineering department, Toyama Prefecture University.

斜面下方向きの力 (Downward Force) は, この差分 ( $D - R$ ) のみで考えるものとし, この力を下方力 ( $F$ ) と定義する。ここで運動方程式を導くとき下方力 ( $F$ ) だけでは, 一旦  $F > 0$  となって静から動に変化した途端に加速度は  $\alpha > 0$  となり速度 ( $v$ ) は増加する一方となって瞬く間に滑落してしまう。そこで地すべりの速度一定や静止に至るまでを再現するためにエネルギー減衰 (応力散逸) を考慮する必要がある。つまり運動方程式にバネ, スライダー, もしくはダンパーなど何らかの減衰項が必要となる。本論文では, 減衰項に対し速度に比例して抵抗するすべり面上のダンパー (粘性抵抗) を適用した。

## 2. モデル解析式

### 2.1 運動方程式の誘導

安定計算式から得られる時系列でのせん断抵抗力 ( $R$ ) と滑動力 ( $D$ ), さらにダンパー ( $k$ ) から時系列での地すべり変位速度 ( $v$ ) と変位量 ( $X$ ) を導く運動方程式を求める。

図-1 に運動モデル図を示す。

ここに,

$F$ :  $x$  方向の下向きの下方力 (kN)

$D$ : 滑動力 (kN)

$R$ : せん断抵抗力 (kN)

$m$ : 移動体の質量 (kg)

$A$ : すべり面の面積 ( $m^2$ )

ただし断面ではすべり面長さ ( $m^2$   $m$  当たり)

$\theta$ : 斜面勾配 ( $^\circ$ )

$t$ : 時間 (sec)

$v$ : 速度 (m/sec)

$\alpha$ : 加速度 ( $dv/dt$ : m/sec $^2$ )

$Cd$ : すべり面の粘性抵抗係数 (kN $\cdot$ sec/m $^2$  当たり)

ここで, 下方力  $F$  は以下で求められる。

$$F = D - R \quad \dots\dots\dots(1)$$

但し,  $R > D$  のとき  $F = 0$

尚, 地すべりの滑動速度を制御するために運動方程式に減衰項を加える。ここでは, すべり面 ( $A$ ) 付近に存在する速度 ( $v$ ) に比例して抵抗するダンパー ( $k$ ) を用いる。

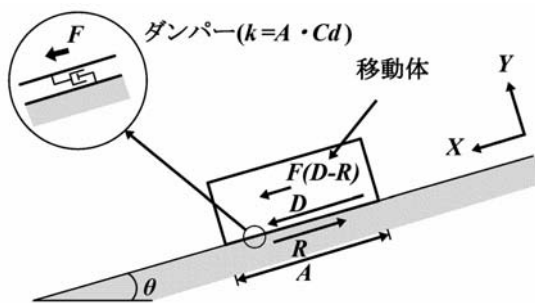


図-1 ダンパーを有す地すべりの運動モデル

Fig.1 kinematics' diagram of landslide body with damper

ダンパー ( $k$ ) は, 単位面積当たり粘性抵抗係数 ( $Cd$ ) とすべり面面積 ( $A$ ) との積とする。

すなわち,

$$k = A \cdot Cd \quad \dots\dots\dots(2)$$

上記より減衰力は  $k \cdot v$  となる。よって, 運動方程式は下記の通りとなる。

$$m\alpha = F - k \cdot v \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3) 式の両辺を  $m$  で割る。また  $\alpha = dv/dt$  であるので,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} - \frac{k}{m} \cdot v \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで,  $G = F/m$  とし式を変数分離形にした後, 積分し指数形を経て  $v$  で整理すると, (5) 式を得る。

$$v = \pm e^{C_1} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + m \cdot G/k \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで,  $C_2 = e^{C_1}$  ( $C_2$  は積分定数)。また, 斜面下方にしか地すべりは移動しないので速度条件  $v \geq 0$  より,

$$v = C_2 \cdot e^{-\frac{k}{m}t} + m \cdot G/k \quad \dots\dots\dots(6)$$

$v = 0, t = 0$  のとき  $e^{-\frac{k}{m}t} = 1$  より  $C_2$  は (7) 式となる。

$$C_2 = -\frac{m}{k} \cdot G \quad \dots\dots\dots(7)$$

よって, (8) 式が得られる。

$$v = \frac{m \cdot G}{k} (1 - e^{-\frac{k}{m}t}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$G = F/m$  および (2) 式の  $k = A \cdot Cd$  と (8) 式から, 最終的に地すべり速度  $v$  の一般解 (9) 式が得られる。

$$v = \frac{F}{A \cdot Cd} (1 - e^{-\frac{A \cdot Cd}{m}t}) \quad \dots\dots\dots(9)$$

### 2.2 地すべり速度と時間依存性

ここで, 図-1 の質点モデルに対し重力加速度  $g = 9.8$  m/sec $^2$  とし  $m = 1,800,000$  kg,  $A = 100$  m $^2$ ,  $\theta = 15^\circ$ , 安全率  $Fs = 0.95$  の地すべり斜面を考える。このとき  $c = 0$  kN/m $^2$  とし逆算した  $\phi$  値は  $14.28^\circ$  となる。また,  $D = 4,565.57$  kN,  $R = 4667.29$  kN,  $F = 228.28$  kN が得られる。ここで, (9) 式の括弧内二番目の項について,

$$\exp^* = e^{-\frac{A \cdot Cd}{m}t} \quad \dots\dots\dots(10)$$

とおく。

図-2 は  $Cd = 10^7$  kN $\cdot$ sec/m ( $m^2$  当たり) とし速度  $v$  と  $\exp^*$  の時間毎の変化を表したものである。ここで (10) 式右辺の  $e$  の指数部 (肩) は負のため時間  $t$  の増加とともに  $\exp^*$  は 0 に近づく性質がある。そのため下方力  $F$  は正となった後, 時間の増加とともに  $\exp^*$  が指数級数的に減少する。これと同時に速度  $v$  の上昇も指数級数的に減少し  $1.3 \times 10^{-5}$  秒後には  $\exp^*$  がほぼ 0 となって最終的に

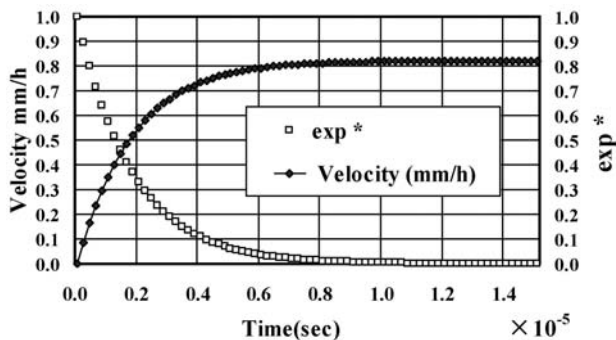


図-2 時間と地すべり速度 (v) およびexp\*との関係  
Fig. 2 Relation between velocity and exp\* for time

速度vは0.822mm/hで平衡状態に至る。これはある意味で1次クリープ現象を表しているが、 $A \cdot Cd$ が一定で大きな値のとき平衡に至るまでは極めて短時間である。

すなわち、一般解(9)式はFが正になってから瞬く間に $exp^* = 0$ となり、そのとき速度vは平衡状態に達してしまう。このため近似的には(11)式となる。

$$v \approx \frac{F}{A \cdot Cd} \dots\dots\dots (11)$$

(11)式は $A \cdot Cd$ が一定の場合“地すべりの下方力 $F \geq 0$ の時、移動速度vはFに比例して増減する”という重大な意味を持つ。

2.3 モデルの挙動

図-3に2.2で導いた(11)式のもつ挙動イメージを下方力(F)と変位(X)の時間変化で示す。

図-3に示す様に、 $F \leq 0$ のときは $v = 0$ で変位Xは増加しない。 $F \geq 0$ となり変位が始まるがFが低下すればvは減少し1次クリープ段階となる。またFが正で一定となると $v = \text{一定}$ となり2次クリープを示す。さらに滑動力Dが増大しFが増加すれば $\alpha > 0$ となり、vは増加をたどって3次クリープ段階に至る(図-3の①)。

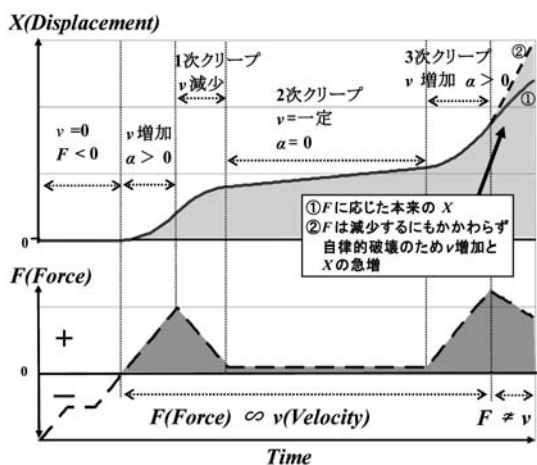


図-3 下方力 (F:下段) の変化と変位 (X:上段) の変化イメージ  
Fig. 3 Schematic diagram for relation between Force (F) and Displacement (X)

なわちFの大きさを時系列でたどればどのクリープ段階にあるかを知ることができる。ただし地すべりは3次クリープの究極段階になった後Fが減少もしくは0となっても一旦自律的破壊モード(宮城,1990)に入ってしまうれば最終的に滑落に至ることがあろう(図-3の②)。この自律的破壊モードについては、強度低下やダンパー(k)値低下など別の要因を付加しないと説明ができない現象である。なお、図-2で示したexp\*の低減によるvの指数的減少も1次クリープ的速度減少とも言えるが、図-3のケースでは神原(2004)が指摘する降雨終了後に認められるvの指数関数的低減現象に一致する。つまり、観測で認められる1次クリープ発現の多くは降雨終了後の地下水低下に基づく間隙水圧の減少と、その結果としてのFの低下による可能性がある。

3. モデル検証

3.1 コスタニェック地すべり概要

コスタニェック地すべり(Kostanjek landslide)はクロアチア国の首都ザグレブ市の西側丘陵地帯の西端部付近に位置しており、およそ幅1,000m、最大長さ約1,300m(平均約1,100m)に及ぶ大規模地すべりである(図-4)。

地すべりの最大層厚は90mで平均層厚も約70mにもおよぶ。地すべり地内および周辺はザグレブ市郊外の居住地となっており多数の民家や工場が存在する。

地質的には層理面の発達したトリポリ泥灰岩が分布す

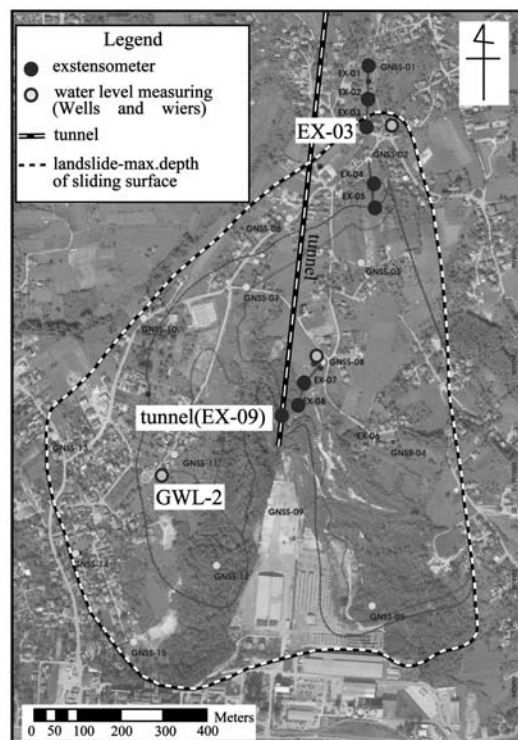


図-4 コスタニェック地すべり計器設置位置平面図  
Fig. 4 Location map of Landslide area and Monitoring equipments

るところで、この泥灰岩の一部が移動土塊となって平均5°程度の緩い流れ盤状すべり面構造を持って南南西へ変動し、末端をバックリング様に隆起させている。地すべり発生の直接的原因は1962年から始まった地すべり末端でのセメント用泥灰岩の掘削である。地すべり地内には泥灰岩ズリ出し用のトンネルが中央部から頭部方向に上向きに緩く掘られており、このため坑口から85~93m付近で移動土塊と奥の安定基岩とは境界をなし、ここで明瞭なスリッケンサイドを有するすべり面粘土が認められる (Furuya *et al.*, 2011)。また地すべり境界付近の家屋には明瞭な開口亀裂や傾動などの変状も認められる。しかしながらこれまで地すべりに対する抜本対策は何もなされておらず、末端の隆起や家屋の変状などがザグレブ市では大きな問題となっている。地すべり変動は地すべり末端で泥灰岩を掘削 ( $2.1 \times 10^6 \text{m}^3$ ) しはじめた後1963年頃から始まった。1988年には総量  $5.3 \times 10^6 \text{m}^3$  の掘削が終了し、その後掘削が中止されたが、この間3~6m/25年の変動があった (Stanic and Nonveiller, 1996)。しかし掘削後も1988年から2009年までの21年で0.75~1.6mの移動量が観測された (丸井ほか, 2013)。

### 3.2 地すべり変動状況

地すべりは2009年以降緩慢な動きを示したが、2011年からは日本国の協力 (SATREPS) の下、ボーリング調査の他、2011年には早期警戒体制の為に伸縮計や地表面GPSが地すべり地一帯に本格的に設置され、またトンネル内のすべり境界部にも伸縮計 (EX-09) が設置された。

この後、図-5に示すように、トンネル内に設置された伸縮計や頭部の伸縮計 (EX-03) において引張変動が徐々に記録され始めるとともにGPSも斜面下方への明瞭な変位を捉えた。とくに2012年以降は連続降雨 (最大169mm/30日) もあいまってその年の8月頃から変位速度

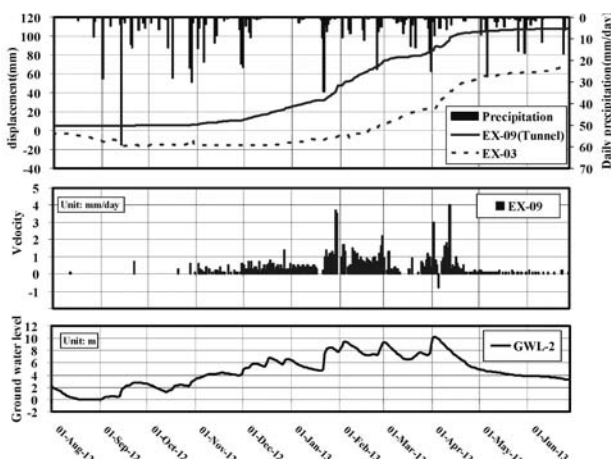


図-5 コスタニェック地すべりの現地降水量、孔内水位 (GWL-2)、伸縮計累積変動 (EX-03, EX-09)、変動速度 (EX-09) の関係

Fig. 5 Relation among monitoring data (daily precipitation, movement of EX-09 and EX-03 as extensometer, velocity of EX-09 and ground water level of GWL-2) at Kostanjek landslide area.

の増加が認められ2013年4月に入ると日平均1~2mmの引張変動が捉えられた (濱崎, 2013)。

### 3.3 モデル計算

図-5を見るとGWL-2孔の水位変動図は降水量を良く反映するとともにトンネル伸縮計EX-09の示す変位の増加傾向との相関性が認められる。また頭部に設置したEX-03も2月以降になるとEX-09とほぼ同様な変動を示すことから、ほぼ地すべり全体の変動と見なせる。

したがって、本モデル手法によって2012-2013年の期間で水位孔GWL-2孔から安定度モデル計算しEX-09の変位量および変位速度を再現することとした。ここでは平均的な地すべり構造で解析可能と考え矩形単純斜面 (質点系モデル) として図-6のような2次元安定計算モデルを設定した。

モデル断面は長さ  $L=1100\text{m}$ 、層厚  $D=70\text{m}$ 、すべり面勾配  $\theta=5^\circ$  とし、移動体の単体重量および水面下の飽和重量を泥灰岩の試験値からそれぞれ  $\gamma_t=18\text{kN/m}^3$ 、 $\gamma_{sat}=19\text{kN/m}^3$  と想定した。また、すべり面の粘着力と内部摩擦角はそれぞれ試験値である残留強度の  $c'=0\text{kN/m}^2$ 、 $\phi'=9^\circ$  (Stanic and Nonveiller, 1996) を採用した。

図-5の2012年9月12日を地下水位の基準日とすると、この基準日のすべり面に対する水頭は57.88m (基準水頭と定義する) である。この基準水頭に対して水位が2.37m上昇 (すべり面からの水頭は60.25m) した9月21日に地すべりは臨界状態となっている。そこで、以下の式を用いて日変化での安定計算および速度計算を行う。計算式は以下の通りである。

なお式中の  $BWL$  は57.88m、臨界水位  $WL$  は2.37mである。また水の単位体積重量を  $\gamma_w=9.8\text{kN/m}^3$  とする。

$$U(t) = (BWL + WL(t)) \cdot \gamma_w : \text{日変動間隙水圧 (kN)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$D(t) = W(t) \cdot \sin \theta : \text{日変動滑動力 (kN)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$R(t) = (W(t) - L \cdot U(t)) \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi' + c' \cdot L : \text{日変動抵抗抗力 (kN)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$F(t) = D(t) - R(t) : \text{日変動下方力 (kN)} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$v(t) = F(t) / L \cdot Cd : \text{日変動速度 (mm/day)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

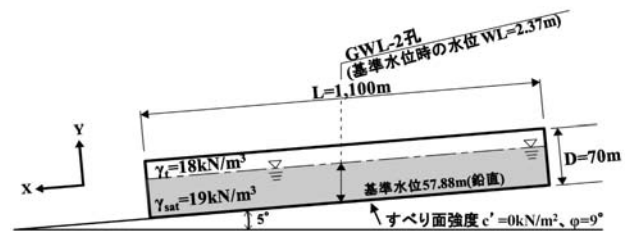


図-6 コスタニェック地すべりの安定解析模式図  
Fig. 6 Schematic diagram of slope stability analysis adapting to Kostanjek landslide

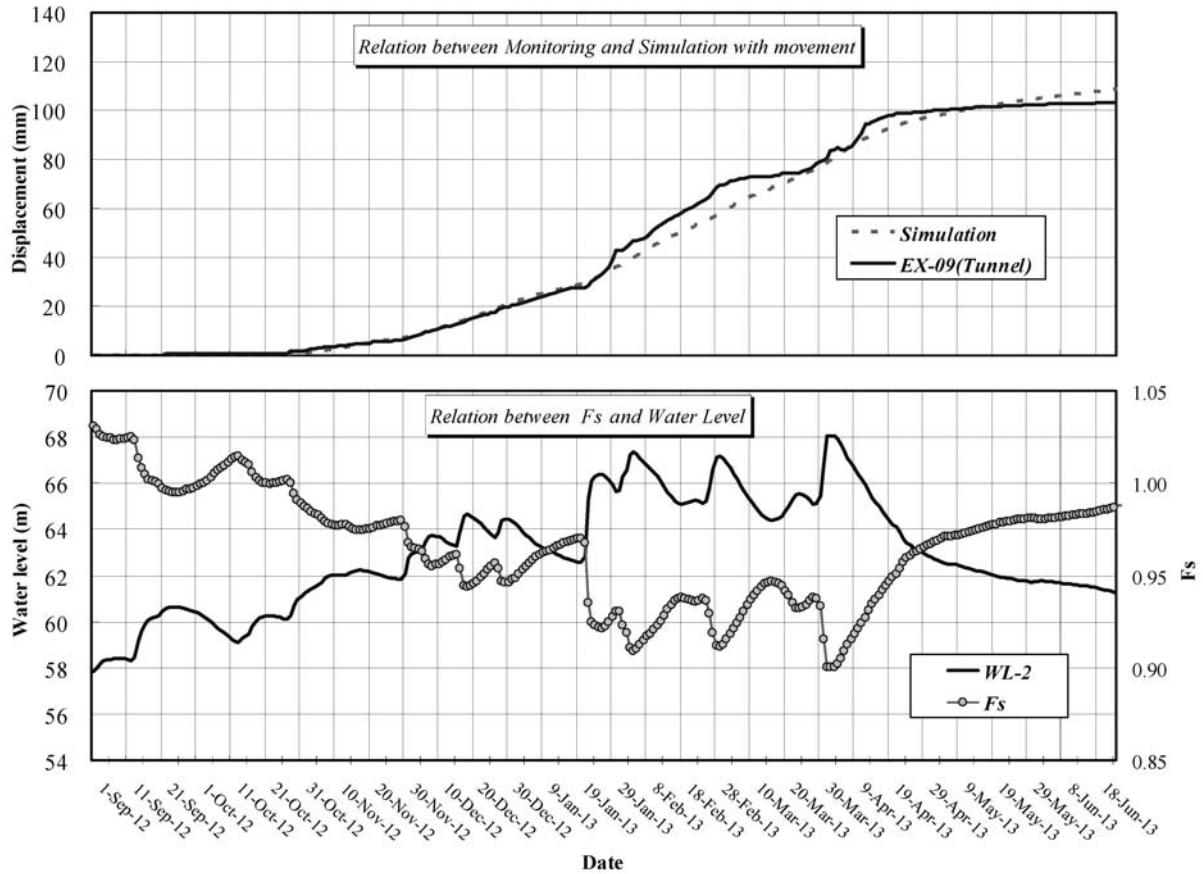


図-7 コスタニェック地すべり内伸縮計EX-09のダンパーモデル解析による変動量再現 (基準日: 9/12)

Fig. 7 Reproduction of landslide displacement by two dimensional model. Diagram shows relation between result (Simulation and Fs) and monitoring data (EX-09, GWL-2) at Kostanjek landslide area. Reference date is 12th Sept.

$$F_s(t) = R(t)/D(t) : \text{日安全率} \dots \dots \dots (17)$$

ここで,

$t$ : 時間 (day)

$WL(t)$ : GWL-2 孔の日変動水位

$W(t)$ : 地すべり移動体荷重

ただし地下水面以上は  $\gamma_t = 18\text{kN/m}^3$ ,

それ以下は  $\gamma_{sat} = 19\text{kN/m}^3$

また,  $Cd$  は  $1.0 \times 10^9 \text{kN} \cdot \text{sec/m}$  ( $\text{m}^2$  当たり) として計算した。計算結果並びに, 本手法から導いた伸縮計 EX-09 のモデル計算移動量と観測値の比較を図-7 に示す。

図-7 の下段に GWL-2 の水位変化と安全率  $F_s$  の変化を示す。また, 上段には EX-09 の変動量について計算値と観測値とを比較して示した。比較の結果, 累計移動量を見る限り 2013 年 4 月以降, 最終段階の緩和するところでわずかな開きがあるものの, 全体の傾向はほぼ一致している。

また計算値と観測値のそれぞれの変位速度について 10 日移動平均法で相関性を検討した。結果は図-8 に示すとおりで, 相関係数  $R = 0.84$ , 平均二乗誤差 (RMSE) は  $0.21\text{mm/day}$  (サンプル数 282 日) と良好な結果を得た。

以上からコスタニェック地すべり変動は本ダンパーモデルで概ね再現されたと判断できる。

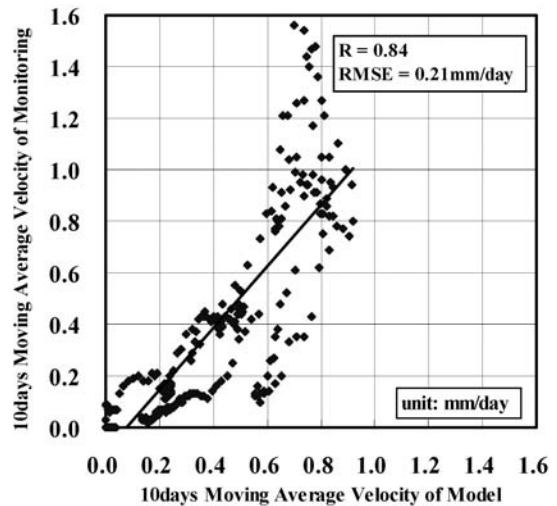


図-8 EX-09変位速度 (10日移動平均) の計算値と観測値の比較

Fig. 8 Comparison between monitoring data and simulation data for 10 days moving average velocity of EX-09 at Kostanjek landslide area.

#### 4. 考察および将来展望

今回提示した計算モデルの意味するところは「速度に比例する粘性抵抗は地すべり運動エネルギーの散逸に寄与する」と「ダンパー  $k (=Cd \cdot A)$  の値が一定であ

るならば, 地すべりの下方力が $F \geq 0$ の時, 移動速度( $v$ )は $F$ に比例して増減する」ことである。なお $Cd$ 値は速度に依存する粘性抵抗であり, すべり面積( $A$ )のみならず粘性抵抗ゾーンの厚みが把握できれば「粘度 (viscosity)」としての物理的意味を持つ。単位はパスカル秒(Pa·s)である。したがって安定解析での土質定数 $c, \phi$ がそのような実際の粘性ゾーンの厚みやその粘度が試験値として得られれば移動速度の順算が可能となろう。ちなみに, コスタニェック地すべりでは変動パターンとしては3次クリープ寸前まで至ったものの滑落するには至っていない。このことから結果として自律的破壊モードまでは達しなかったといえる。もっとも, このときの移動量は日最大変動2 mmで緊急避難などで良く用いられる管理基準値の2 mm/hまでは上昇していない。このような自律的破壊モードに至る条件も今後の重要な課題の一つである。すなわち自律的破壊条件として「限界ひずみを超えることによる強度低下もしくは $Cd$ 値そのものの低下」または「粘性を発揮するゾーンの変化, 縮小」など種々考えられる。

近い将来の展望としては, 本手法が安定計算の延長線上にあり将来予測上において連続した安定解析が可能なケース, 例えば100年確率雨量に対してタンクモデルや実効雨量法などを利用した連続する安定計算結果が得られる場合であれば将来の安定度のみならずその変動量も予測可能となろう。またこの手法は今のところ長～中期変動における予測モデルとして有用であると判断するが, 将来的には短期滑落予想モデルに対しても福囿式や斉藤式のようなクリープモデルとのカップリングなどで滑落的中率の向上が図れる可能性がある。今後この手法での解析例が増加すれば $Cd$ のもつ定量的物性範囲と力学的意味が次第に明らかとなるものと期待する。特にこれらの研究から自律的破壊に至る限界条件が見いだせる可能性は大きい。また将来は土質試験, せん断試験などを通してダンパーの意味や理解が進むものと期待する。

## 5. まとめ

- (1) 地すべりの安定解析手法を応用し地すべり下方力( $F$ )に対して速度( $v$ )に依存するダンパーを加えた運動方程式を解き時刻列毎の地すべり変位速度, 変位量を解析する手法を提示した。
- (2) 本手法をコスタニェック地すべりに適用した結果, 刻々の変位速度をほぼ再現することができた。
- (3) 本手法を用いれば, 例えば100年確率雨量に対し

タンクモデル等での水位再現が連続的に可能なら, 安定解析を連続的に行うことで, 安全率( $F_s$ )の変化のみならず将来の移動速度( $v$ )と移動量( $X$ )の想定も可能となる。

## 謝辞

本研究発端となりました地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) の「クロアチア土砂・洪水災害軽減基本計画構築」チームとしてご協力いただきましたすべての皆様に深い感謝の意を表します。

## 引用文献

- 榎田充哉・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.
- 藤井弘章・西村伸一・堀俊男・島田清 (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.
- 福囿輝旗 (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.
- Furuya G., Migagi T., Hamasaki E. & Krkac M. (2011): Geomorphological mapping and 3D modeling of the Kostanjek landslide, Zagreb. In: OZANIC, N. et al. (eds) Proc. 2nd Workshop of the Project Risk identification and Land-Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia. Rijeka, December 2011.
- 濱崎英作 (2013): Kostanjek地すべりに関する現状評価と実用的な類似早期警戒例, 地球規模課題対応国際科学技術協力-クロアチア土砂・洪水災害軽減基本計画-, Kostanjek地すべりに関する緊急対応調査報告書, pp. 2-12.
- Ishii Y., Ota K., Kuraoka S. & Tunaki R. (2011): Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide, Landslides 9, pp. 335-348.
- 神原規也 (2004): 地すべり変位速度の指数関数的低減現象, 日本地すべり学会誌, Vol. 41, No. 1, pp. 28-36.
- 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.
- 丸井英明・吉松弘行・濱崎英作・加藤猛士・王純祥 (2013): クロアチアの土砂・洪水災害軽減のための共同研究 (II) - 活性化した地すべりに対する緊急対応事例 -, 水利科学, 2013, No. 332, pp. 146-167.
- 宮城豊彦 (1990): 地形分類による地すべり地の危険度評価. 地すべり学会シンポジウム, 「地すべり災害発生危険箇所の把握に関する諸問題」論文集, pp. 1-5.
- 斎藤迪孝 (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.
- Stanic B. and Nonveiller E. (1996): The Kostanjek landslide in Zagreb, Engineering Geology, 42, pp. 269-283.
- 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.
- 若井明彦・吉松弘行 (2013): 地すべりを再現するための数値解析手法の現状, 日本地すべり学会誌, Vol. 50, No. 1, pp. 7-17.
- (原稿受付2016年2月18日, 原稿受理2016年5月25日)