

地すべり移動速度予測のためのダンパー質点系モデル

Lumped mass damper model to predict moving velocity of landslide

濱崎英作 (株式会社アドバンテクノロジー) *, 丸井英明 (新潟大学), 加藤猛士 (川崎地質株式会社),
古谷元 (富山県立大学), 王純祥 (株式会社キタック)

Eisaku HAMASAKI (Advantech Co., Ltd.), Hideaki MARUI (Niigata Univ.), Takeshi KATO (Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.), Gen FURUYA (Toyama Prefectural Univ.), Chunxiang WANG (KITAC Co., Ltd.)

キーワード: 地すべり, 変位速度, ダンパー, 斜面安定解析, 質点系ダンパーモデル

Key words: Landslide, Displacement velocity, Damper, Slope stability analysis, Lumped mass damper model

1. 概要

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。筆者らはこの課題解決のため速度 (v) に応じて抵抗を発揮するダンパーを運動方程式に取り入れた”ダンパー質点系モデル”を考案した。本式は、すべり運動方程式の減衰項に対し v に比例して抵抗するすべり面上のダンパー (粘性抵抗: k) を適用した質点系モデルである。質点系モデルは斜面安定解析式 (例えばフェレニウス法やRBSM法) に直接リンクできる点でメリットが大きい。下向きの力 (F : 以下, 下方力) を滑動力 (D) と抵抗力 (R) の差 ($D - R$) としたとき, k を考慮した運動方程式から導かれた当モデルの一般解は F と v が密接な比例関係にあることを示している。これは少なくとも 3 次クリープの前段階にある地すべり事例 (例えば榎田他, 1994) の多くで, F に関わる間隙水圧 (u) の増減に応じて v が増減し, v と F が相関して変化している現象を良く説明している。ここでは, 解析事例の一つとしてクロアチアのKostanjek 地すべりに適用した事例を示す。結果は, 地下水位の変化に応じた 10 日移動平均速度と日変位量において観測結果の再現が良好でこの式の妥当性を示した。

2. ダンパー質点系モデル式の誘導

図-1 に質点系モデルとしての運動モデル図を示す。

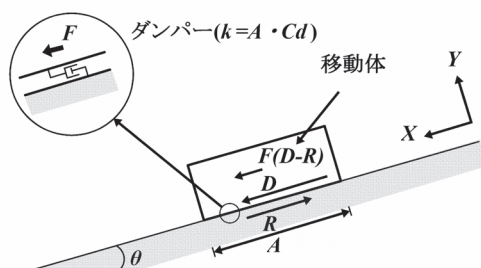


図-1 ダンパーを有す地すべりの運動モデル

図の移動体の質量を m とすると重量 (w) は重力加速度 (g) から $w=mg$ である。 v に掛かるダンパー係数 (k) はすべり面と不動体境界に位置するものとし, k はそのすべり面の面積 (A) とすべり面における単位面積当たり粘性抵抗係数 (Cd) との積 ($k=A \cdot Cd$) とする。また, 発生する速度減衰力は $k \cdot v$ とする。安定計算式から得られる R と D から安全率は $Fs=R/D$ であるが, ここで $D > R$ の

とき下方力 F が発生するものとする。なお $D \leq R$ では $F=0$ である。 X 方向下向きの加速度を a とし, 時系列 (t) で R, D, F が変化するとして地すべり変位速度 (v) を導く運動方程式を求める。運動方程式は(1)の通りである。

$$ma = F - k \cdot v \quad \dots\dots\dots(1)$$

(1)式の両辺を m で割る。また $a = dv/dt$ より,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} - \frac{k}{m} \cdot v \quad \dots\dots\dots(2)$$

また, $G = F/m$ とし式を変数分離形とした後, 積分し指数形を経て v で整理すると, (3)式を得る。

$$v = \pm e^{C_1} \cdot e^{\frac{-k}{m} \cdot t} + m \cdot G / k \quad \dots\dots\dots(3)$$

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,

$$v = C_2 \cdot e^{\frac{-k}{m} \cdot t} + m \cdot G / k \quad \dots\dots\dots(4)$$

$v=0, t=0$ のとき $e^{\frac{-k}{m} \cdot t} = 1$ より C_2 は(5)式となる。

$$C_2 = -\frac{m}{k} \cdot G \quad \dots\dots\dots(5)$$

よって, (6)式が得られる。

$$v = \frac{m \cdot G}{k} (1 - e^{\frac{-k}{m} \cdot t}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$G = F/m, k = A \cdot Cd$ と(6)式から, 最終的に地すべり速度 v の一般解として(7)式が得られる。

$$v = \frac{F}{A \cdot Cd} (1 - e^{\frac{-A \cdot Cd}{m} \cdot t}) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで, (7)式の括弧内二番目の項 $e^{\frac{-A \cdot Cd}{m} \cdot t}$ は指数部 (肩) が負のため時間 t の増加とともに極めて短時間 (事例計算では 10^{-4} 秒以下) で 0 となる。

よって一般解(7)式の F が正になってから瞬く間に v は平衡状態に達する。結果, 近似的に(8)式が得られる。

$$v \approx \frac{F}{A \cdot Cd} \quad \dots\dots\dots(8)$$

3. モデル式から考察される地すべり挙動

図-2 に(8)式のもつ挙動イメージを F と変位量 (X) の時間変化(t)で表す。図-2 に示す様に, $F \leq 0$ のとき $v=0$ で X は増加しない。 $F > 0$ となって変位が始まるが 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 =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、結果 v は増加し 3 次クリープ段階となる (図-2 の①)。すなわち 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 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) に入ってしまったら最終的に滑落到に至る (図-2 の②) が本稿ではこれには触れない。

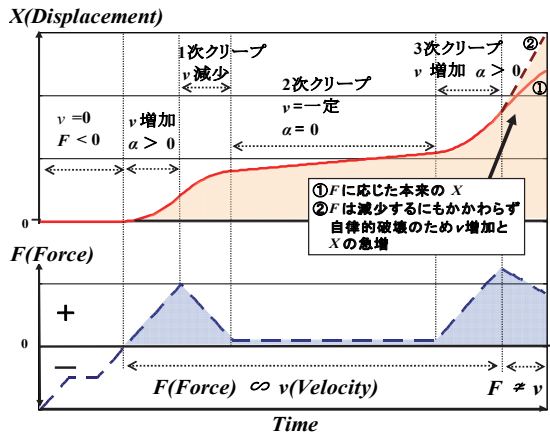


図-2 下方力 (F : 下段) の変化と変位 (X : 上段) の変化イメージ

4. モデル検証

検証地の Kostanjek 地すべりはクロアチア国の首都ザグレブ市の西側丘陵地帯にある幅約 1,000m, 最大長さ約 1,300m (平均約 1,100m), 最大層厚 90m (平均層厚約 70m) に及ぶ大規模地すべりである (図-3)。

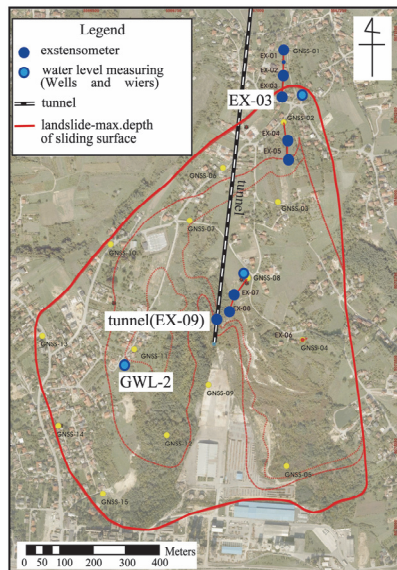


図-3 Kostanjek 地すべり計器設置位置平面図

地質的には層理面の発達したトリポリ泥灰岩が分布するところで、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な原因は 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。もともと何度も大きな変位を繰り返してきたが、SATREPS (日本政府協力) のもと 2011 年以降に設置した計器は 2012 年ころ

から明瞭な変動を捉えだし、頭部伸縮計 EX-03 と、ズリだしトンネル内に設置した伸縮計 EX-09 に引張変動の増大が認められた。それと同時に地すべり地内の西翼に設置された GWL-2 水位孔の水位は EX-09 伸縮計の観測日変位速度 v との相関が明瞭に認められた (丸井他, 2013)。ここで GWL-2 水位孔の変動をもとに当モデルを用い EX-09 伸縮計の日変位量を再現を試みた。すなわち、当すべりを現地試験値をもとに図-4 に示すようにモデル化した。

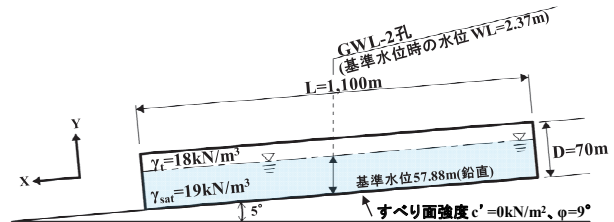


図-4 Kostanjek 地すべりの安定解析模式図

Cd は $1.0 \times 10^9 \text{ kN} \cdot \text{sec} / (\text{m}^2 \text{ 当たり})$ 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-5 に示す。図の下段に 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、全体の変動傾向を再現しており当モデルの妥当性が示された。

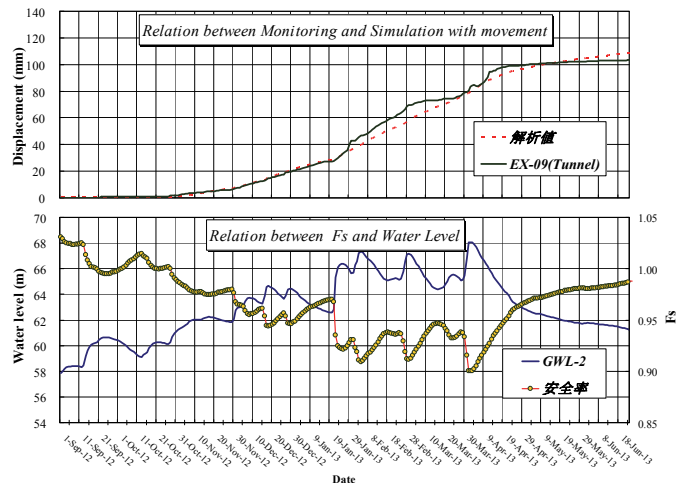


図-5 Kostanjek 地すべり内伸縮計 EX-09 の変動量再現

引用文献

- 1) 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.
- 2) 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)ー活性化した地すべりに対する緊急対応事例ー, 水利科学, 2013, No. 332, pp146-167.
- 3) 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, 「地すべり危険箇所」の把握に関する諸問題」論文集, 1_5.