

質点系ダンパーモデルを用いた地すべり滑落予測法に関する研究

A Study on Failure Forecast Method of Landslides using Lumped Mass Damper Model

濱崎英作 (アドバンテクノロジー), 丸井英明 (新潟大名誉教授), 池田浩二 (東北開発コンサルタント), 山邊康晴 (興和), 古谷元 (富山県立大学), 石川晴和 (アドバンテクノロジー)

Eisaku HAMASAKI (Advantechology), Hideaki MARUI (Niigata Univ.), Kouji IKEDA (Tohoku development consultant), Kosei YAMABE (Kowa), Gen HURUYA (Toyama Pref. Univ.) and Haruna ISHIKAWA (Advantechology)

キーワード: 変位速度, 滑落予測, 質点系ダンパーモデル, タンクモデル

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

1. はじめに

地すべり崩落時刻を予想する手法として斎藤式 (1987), 福園式 (1990) は一般的によく使われている。これらの手法は変動のある斜面においてそれまでの経過時間と地すべり変位量を収集し, それを基に滑落時間を予測するものである。ただし, 両式共に地すべりの規模や形状, 地すべりを促進させる誘因を考慮したモデルではない。したがって限界歪みを越えた三次クリープ段階での予想では一定の成果を上げることができないもの, 地すべり地内の間隙水圧の予想外の上昇など加速要件を取り込むことはできない。他方, 濱崎・丸井ほか (2016) は地すべりの移動速度を予測するモデルとしてLMDM (質点系ダンパーモデル) を開発した。これを用い16事例を解析した結果, 限界歪み前の2次クリープ段階までの地すべりの多くで地すべりの移動観測結果とモデル値の良好な再現があった (濱崎, 2017)。今回, このLMDMを利用し, その応用形として自律的破壊過程に至り崩壊するまでのモデル化について研究を加え改良の手応えを得たのでここに報告するものである。

2. モデル化の方法

濱崎・丸井ほか (2016) の提案するLMDMは運動方程式に地すべり速度に依存する粘性ダンパーを考慮したクリープモデルで, 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), さらに移動速度 (v) に比例して抵抗する粘性ダンパー (k) から時系列の地すべり変位速度 (v) と変位量 (X) を導く簡便な手法である。モデル式は, フェレニウス法やRBSM法などの安定計算で用いられる D, R から下方力を $F=D-R (F>0)$ と定義すると最終的に(1)式が得られる。

$$v \approx \frac{F}{A \cdot Cd} \dots\dots\dots (1)$$

ここに v : 地すべり移動速度, Cd : 粘性抵抗係数, A : すべり面面積である。また Cd はすべり面粘土層厚 (h) と k の積で表される。崩落時間を予想するためには, モデル移動量が実測と乖離する自律的破壊 (限界歪み) 以降から崩落まで追跡可能なことが重要である。そこで, 乖離以降について速度条件を越えたときの Cd , もしくは

ϕ の低減を考慮するモデルを作成した。

3. 解析結果

3.1 モデル適用現場

本研究では地すべり滑落予想モデルを作成するに当たって, 2007年3月~7月に発生し最終的に7月5日に大崩落した宮城県白石市の追久保地すべり (白石市追久保地すべり調査チーム, 2007) の観測データを用いた。この地すべりは, 地すべり崩落までの伸縮計による移動量観測と時間降水量が計測された貴重な現場で, 池田ほか (2016) が三段直列タンクモデル水位解析とLMDMを使った移動再現解析を実施し, その結果, 初期LMDMモデルにおいて6月30日までの良好な再現結果が得られた。ただし, 6月29日~30日の大雨 (73.5mm/13時間) 以降からはモデルと観測結果が乖離しだし, 最終的に7月5日に大崩落に至っている。LMDMの矩形モデルとしての地すべり諸元は, 地すべり長さ $L=300m$, 移動体厚み $T=30m$, すべり面勾配 $\theta=20^\circ$, 土塊単体重量 $\gamma t=18kN/m^2$, 粘着力 $c=0.0kN/m^2$, 摩擦角 $\phi=20^\circ$, 粘性抵抗係数 $Cd=0.62 \times 10^9 kNsec$ である。また3段タンクの孔係数, 孔高さ, 有効空隙率については池田ほか (2016) に従う。図-1は当地区の時間雨量(mm)とタンクモデルによる水頭変化(mm)を表している。

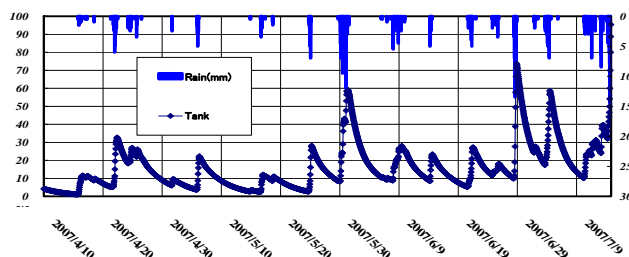


図-1 タンクモデルによる水位再現

3.2 解析結果の比較

図-2は, 24時間移動平均 (mm/day) の実測値 (S-3伸縮計) とLMDM値で解析値は Cd および ϕ が不変であるときのものである。ここで, Case-1として実測24時間移動平均を基にその値と $\tan \phi$ の低減率を図-3左図の如くとし, 他方Case-2として同じく Cd の低減率を図-3右

図のような関係式として検討した。その結果、図-4のように両者で地すべりの崩落直前までの実測移動量に近似した結果を得た。

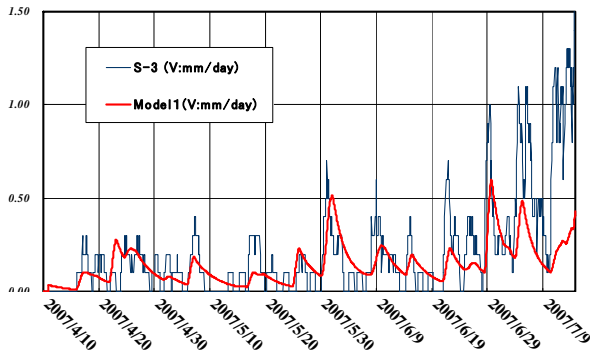


図-2 実測とLMDM値(Model1)の24時間移動平均速度

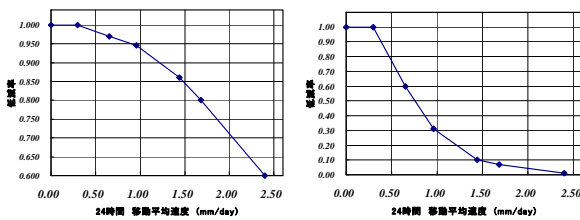


図-3 24時間移動平均速度に基づく ϕ , Cd の低減率

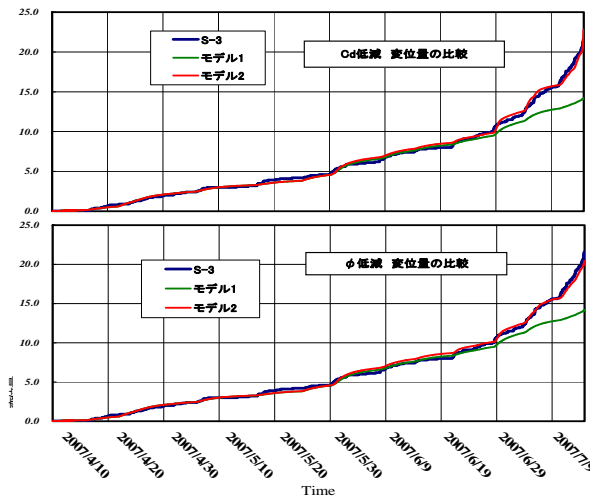


図-4 崩落までの移動量の再現(縦軸: mm)

ちなみに図-4の下段図のモデル2(赤)が ϕ を低減したケースで、上段図のモデル2が Cd を低減したケースである。なお、共に青が実測で、緑(モデル1)は Cd および ϕ が不変のときのものである。モデルと実測の移動量における最小二乗誤差平均RMSEはCase-1で0.304mm, Case-2で0.317mmでほぼ同等で、ともに優れている。

4. 考察

図-3を比較すると、24時間移動平均速度での ϕ 低減率と Cd 低減率の関係式では、前者が $v=0.3\text{mm/day}$ を境に速度増加に合わせ徐々に低減しているが、後者は $v=0.3\text{mm/day}$ を境に指数級数的に低減している。図-5は実測の24時間移動平均速度の変化(赤)と、それによ

て割り当てられた低減 ϕ (青)の変化を示す。ここで、低減 ϕ の変化を見ると、良好な再現を得るには一旦減少した ϕ もその後移動速度が小さくなったとき再度増加する必要があることを示している。

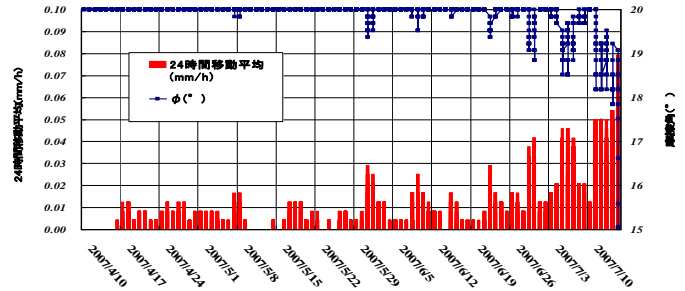


図-5 24時間移動平均速度と ϕ 低減の時間的経過

すなわち、一旦 ϕ が小さくなったとしても速度低下後には ϕ 強度の回復が必要となる。ただ残留強度が移動停止後に強度回復し軟化強度になることはあるとしても移動中に、また短期にこのような強度回復が生じ得るのか疑問が残る。特に速度依存による摩擦角 ϕ 低減が粘土粒子骨格の破壊に起因するとした場合、速度が緩和されたあと即座に強度回復するとは思えない。他方、 Cd 低減が粘土のチクソトロピー効果—せん断速度依存性—の結果として生じることは妥当と考えている。また最終滑落時間の予測は Cd 値、もしくは ϕ 値の低減状況を時間毎にプロットすることによって可能であろう。つまり低減率が小さくなる過程が明瞭になればそれから最終局面を予想できる可能性があると考えられる。少なくとも低減し始めたことが判明したときを「崩壊要注意」の局面に入ったと判断することは出来るであろう。この手法については、現在さらに研究を進めているところである。

参考文献

- 1) 福園輝旗 (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.
- 2) 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パー質点系モデル, 日本地すべり学会誌, Vol. 53, No. 4, pp. 128-133.
- 3) 濱崎英作 (2017) : 質点系ダンパーモデル(LMDM)による地すべり変位量予測法, 平成28年度新潟大学復興科学研究所年報 2017年3月, pp. 213-313
- 4) 池田浩二・濱崎英作・丸井英明・佐々木明彦・石川晴和 (2016) : ダンパー質点系モデルとタンクモデルを用いた追久保地すべり変位再現, 第55回地すべり学会研究発表会講演予稿集, 1-14
- 5) 地すべり学会東北支部追久保地すべり調査チーム (2007) : 2007年7月15日に宮城県白石市で発生した地すべり, 日本地すべり学会誌, 第44巻, 第3号, pp. 44.
- 6) 斎藤迪孝 (1987) : 斜面崩壊時刻予測のためのクリーブ曲線の適用, 地すべり, vol. 24, No. 1, pp. 30-38.