

質点系ダンパーモデル(LMDM) ー地すべり移動予測ー

Lumped mass damper model—prediction method of landslide movement—

濱崎英作* Eisaku HAMASAKI／(株)アドバンテクノロジー, (株)三協技術 Advantech Technology Co., Ltd, Sankyo Co., Ltd

江藤 大 Masaru ETOU／(株)アイエスター Institute Slope Technology Co., Ltd

大鶴泰史 Taishi OOTSURU／(株)アイエスター Institute Slope Technology Co., Ltd

池田浩二 Kouji IKEDA／(株)東北開発コンサルタント Tohoku Development Consultant Co., Ltd

1. はじめに

質点系ダンパーモデル(LMDM:Lumped mass damper model, 以下“LMDM”)は地すべりの移動量や移動速度を簡便にモデル化するツールの一つです¹⁾。

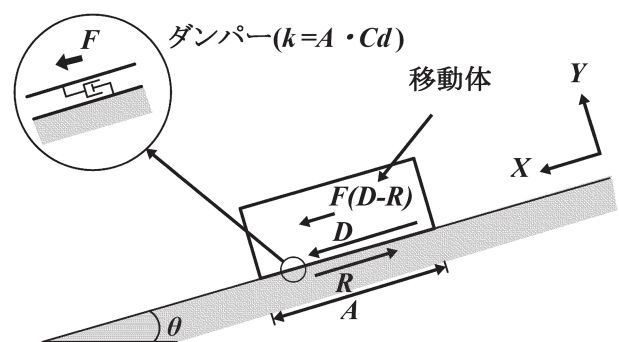
地すべりでは、極限平衡法安定解析が機構解析のみならず対策工の諸量を決定するのに重要なツールとなっていますが、一方で、地すべり事業も対策工に限界があるとき、これまでの安定解析の計画安全率設定だけでは事業完了条件が満たせないケースも散見されています。そのようなケースでは地すべり移動速度や移動量に着目する性能規定導入を前向きに検討し始めようとしている事業体も出始めています。例えば、「当該地すべり対策工の性能設計条件として100年確率の豪雨に対しても地内を通る道路の変位許容量が年10cm以内＝簡便に補修できて常時通行可能である量以内」として規定できれば、その規定値を判断出来るような移動量、移動速度をモデル化し確率統計などで数値化し信頼性を担保できれば性能設計の導入も可能となるでしょう。

もう一つ、「地すべりの移動をモデル化出来ればいいな」と思うケースがあります。それは、対象とする地すべりの移動速度が降雨などでどんどん変化するとき、それが最終的に一気に滑落する可能性はどれくらいあるのか、はたまた何時の段階で周辺住民を避難させねばならないかなど警戒判断基準をより合理的に判断するツールとしての役割です。ここでは、LMDMの仕組みとその役割、発展性など、できるだけ簡便に説明したいと思っています。

2. 仕組み

2.1 基本式

LMDMの仕組みは至って簡単です。基本は簡便スライス法(フェレニウス法)のような極限平衡法安定解析の延長でモデル化できます。すなわち、移動体全体としての滑動力(D : Driving Force, 以下 D)と抵抗(R : Resistance Force, 以下 R)の差分で、 R が D を下回ったときに、その超過した分の滑動力(F : Force, 以下 F)、



図－1 ダンパー(ダッシュポット)を有す地すべりの運動モデル¹⁾

つまり $F = D - R$ が正(>0)となるときの移動が始まるというもので、地すべりの移動速度(v : Velocity, 以下 v)は超過滑動力(F)に比例して変動する、というものです。つまり図－1のようになります。

すべり面上にくっついて描かれているのは粘性ダンパー(ダッシュポット)です。これは下向き移動速度に比例して逆向きに働く制御装置です。これを運動方程式で表すと式1のようになります。

$$m\alpha = F - k \cdot v \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、

F : x 方向の下向きの超過滑動力 (kN)

D : 滑動力 (kN) $= W \cdot \sin \theta^*$

R : セン断抵抗 (kN) $= \tan \Phi (W \cdot \cos \theta - u) + CL^*$

m : 移動体の質量 (kg) W : 重量 (kN) $= mg$

A : すべり面の面積 (m^2) u : 間隙水圧 (kN)

ただし断面ではすべり面長さ (m^2 , m 当たり)

θ : すべり面勾配 ($^\circ$)

t : 時間 (s)

v : 速度 (m/s)

α : 加速度 (dv/dt : m/s^2)

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

この先これをダンピング係数とする。

* D, R の式についてはあくまで簡便スライス法

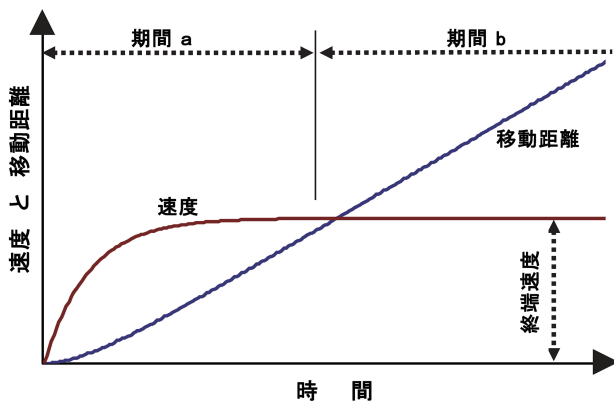


図-2 F一定のときの速度と移動距離

の場合。

したがって、安全率 F_s は $F_s = R/D$ で定義されます。

この微分方程式を積分すると式(2)のようになります。

$$v = \frac{F}{A \cdot Cd} \left(1 - e^{-\frac{A \cdot Cd}{m} t} \right) \dots\dots\dots (2)$$

試しに、この式に時間軸（横軸）の中で一定の正の F の値を入れて速度と移動量を図化してみましょう。移動量は速度を時間積分すれば描けます。縦軸に速度と移動量（速度の1/100で図化）を描くと図-2のようになります。つまり、急激な動き出しから速度が一定になるまでは図-2の期間aのようになって、移動体は徐々に加速度を低下させていき、粘性ダンパーと釣り合ったあとは期間bのように一定の速度で移動することになります。これはクリープモデル図の一次、二次クリープを表しています。

この期間aは極めて短時間のことですが、それは式の $e^{-\frac{A \cdot Cd}{m} t}$ がもたらしめています。短時間ですからこれを0としてもほとんど影響はありません。

したがって $e^{-\frac{A \cdot Cd}{m} t} = 0$ としますと式(3)ができます。

$$v = F/Cd \cdot A \dots\dots\dots (3)$$

式(3)は、結局のところ二次クリープ状態を表しています。当たり前のことですが最初にお話した「移動速度(v)は超過滑動力(F)に比例して変動すること」を表しています。また、粘性ダンパーは、それが作用する変形層厚（すべり面厚さ）も分かる必要がありますがこれは簡単ではありません。ここでは層厚と粘性抵抗の積としてダンパー係数 Cd と称して一括することとします。

2.2 超過滑動力 F の増加・減少要因は？

ここで、簡便スライス法を使ってLMDMについても少し詳しく見ていきましょう。ここで単純に R と D に掛かる成分をそれぞれ見れば、速度 v が何に依存しているかよく分かります。

つまり、 $R = \tan \Phi (W \cdot \cos \theta - u) + CL$ ですから、この式の中で地下水問題に関わるのは間隙水圧 u です。この u が増加すると、線形的（一次式的）に R が減っていき

ます。そして、あるところを境に $D (= W \cdot \sin \theta)$ より R が小さくなって $F \geq 0$ になります。その瞬間は安全率(F_s)も「1」で、これを臨界と呼びます。 F が正になれば前述した図-1の仕組みで移動体は動き出します。水位がどんどん上昇すれば u もどんどん大きくなって速度 v が早まるわけです。

また、動いている地すべりの対策工として末端に盛土したり、頭部を切土することがあります²⁾。盛土や切土などですと移動体重量 W が変化するため D や R もそれに伴って変化します。つまり、この対策の過程で安定解析の中の R や D が変化し F_s が上昇し F も減少することから地すべり速度が徐々に収まっていきます。この辺の仕組みは皆さんもよく分かっておられると思いますので、ここではこれ以上詳しくは述べませんが、皆さんがご自分でいろいろ試してみてください。そして $F = D - R$ に変えてその変化を試してみてください。

もちろん、杭やアンカーなどの抑止力をいれることも可能です。安定計算上はその抑止力(P)は D で引き算するか R で足し算するか意見が分かれるところで安全率自体も変わりますが、LMDMに限っていえば、それは結局同じことになります。つまり、 $D' = D - P$ もしくは $R' = R + P$ としても $F = D - R - P$ になるからです。

ところで杭は地すべり荷重が杭に作用しだして初めて効果を発揮する待ち受け型です。また盛土も場合によっては効き方にタイムラグが生じます。実は、ある大型土嚢を使った盛土対策の地すべり災害現場では移動体と土嚢に隙間があったため、それらが接するまではしばらく動きが止まりませんでした。このような移動体と土嚢に隙間があるケースでは、杭と同様に効き始めに時間差がでることもあります。つまり対策の手順、工法によって効果の発揮の仕方が違ってきますので注意が必要です。

2.3 質点系とは？

ここで、質点系ダンパーモデルの“質点系”とはどういうことか考えてみましょう。

実は、移動量解析には地すべりを細かく要素分割して地すべり運動を数値解析する有限要素法(FEM)があり、このような解析事例論文も沢山あります。これらの解析を質点系とは言いません。このような解析は移動体内部の応力やヒズミを細部で検証しつつ現象を解き明かそうとする高度な解析です。他方、地すべり安定解析も、2次元では解析斜面をスライス分割したり、3次元でもカラム分割するなど、ある種要素分割しています。しかし安定解析の場合、最終的には移動体を一個の“塊”として全体系の安全率で評価しています。つまり図-3のように、形はどうであれ最終的には総括して R と D に落とし込んで塊で総合評価します。同じように、LMDMでも塊である移動体全体系としての R と D の変化しか見ませんし、移動体内での細かい変化は今のところ問題にしません。このことからあえて“質点系”のダンパーモデルと名付けられました。ただし、LMDMが安定解析と異

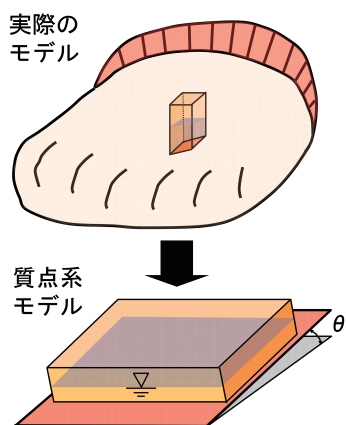


図-3 質点系モデル転換

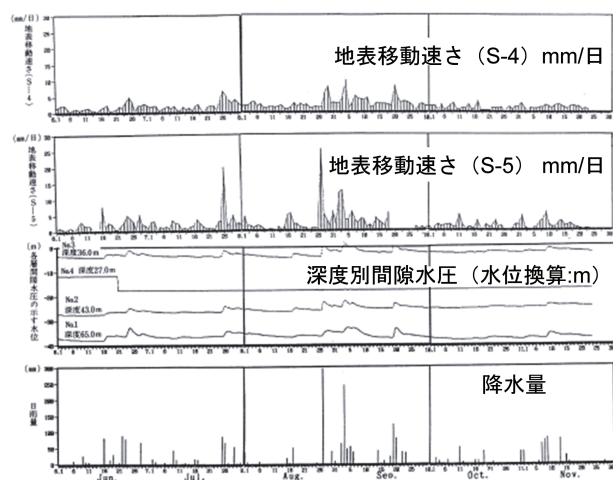


図-4 口坂本観測データ図²⁾³⁾

なるのは速度や移動量を解析するために時系列で連続的に計算するかどうかだけです。

3. モデルの作り方

3.1 長期変動予測モデル

LMDMの計算手法はおおよそつかめたかと思いますが、実際に動いている地すべりの移動体の中に、既に水位や間隙水圧が測定されている水位孔があれば、その観測値を見てみましょう。このとき図-4のように観測データの中に移動速度と水位変動に相関性が認められれば、かなりの確度でモデル化出来ると思います。

もっとも地すべり観測孔全てが移動との相関が良いとは限りませんが、使用可能な孔を用い平均化したりして単純な矩形モデルに落とし込んでLMDMを検討すればよろしいでしょう。もっとも三次元安定計算で検討するならば、可能な限り変位に応答する水位孔を選定して全体でモデル化することが望ましいと思います。そして降雨応答に伴う長期的変動の予測モデルを作りたい場合、まずは孔内水位変動や全体系での間隙水圧の変化をモデル化する必要があります。このために、まず式(4)、(5)の実効雨量をお試しください。解析例を図-5に示します。

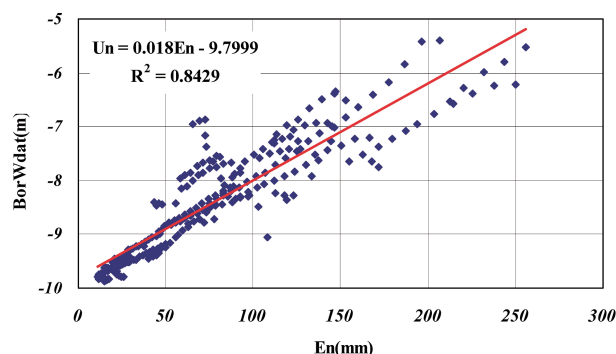


図-5 ボーリング孔内水位と実効雨量 (En) の相関図

$$E_n = R_n + \alpha \cdot E_{n-1} \dots\dots\dots(4)$$

ここで

α : 低減係数 ($0 < \alpha < 1$)

R_n : n 日の雨量

E_n : n 日の実効雨量

この実効雨量 E_n に対して、(6)の一次回帰式(指数式もあり)を用いて、 u の変化をモデル化します。

$$U_n = a \cdot E_n + b \dots\dots\dots(5)$$

ここで

U_n : n 日のモデル間隙水圧

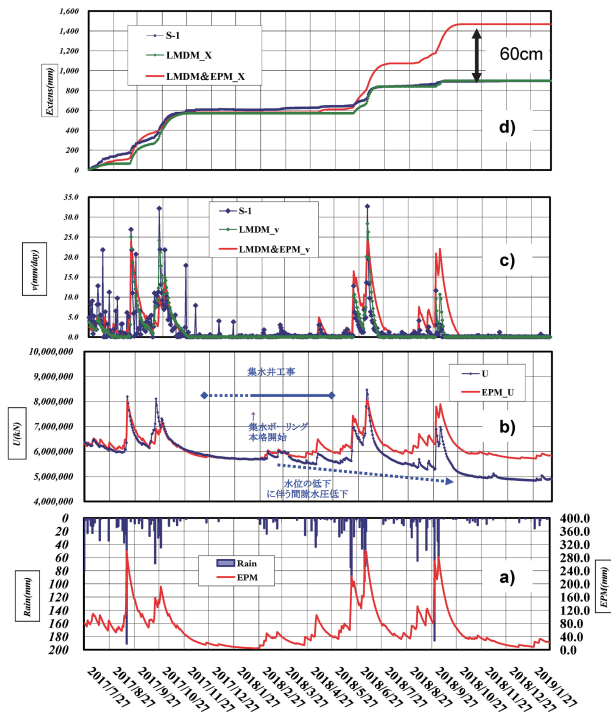
a, b : 定数

水位変動のモデル化には、他に土壌雨量指数などにも使われる3段直列タンクモデルがよく使われます。その他、 Ψ 関数モデル⁴⁾などもありまし、Modflowなどの地下水流動解析で予測する方法もあります。

肝心なことは、降雨などの連続する涵養量を水頭圧変化に置き換え、それを時間毎に逐一安定解析式に落とし込めれば良いのです。図-6にホフランド法三次元安定解析による実効雨量とLMDMの解析事例⁵⁾を示します。

実効雨量モデル式は集水井工事前の期間で解析されています。図-6a)には降水量と実効雨量(赤)を、b)には時系列で計算された実際の u (青)と実効雨量から推定された無対策時のモデル間隙水圧(赤)を示しています。図-6c)には実際の伸縮計(S-1)で観測された移動速度(青)とLMDMによって解析された移動速度(緑)、および無対策時モデルとしての移動速度(赤)をそれぞれ示しました。図-6d)にはc)で示される積分値としてのそれぞれの移動量を図化しています。図-6d)に示すようにLMDMの移動量(緑)はS-1伸縮計の地すべり実移動量(青)をほぼ再現しています。無対策想定モデル変位量(赤)の検討の結果、集水井対策工終了後の数回の大雨で大きく変位し、実移動量(青)との変位差は60cm以上あります。すなわち集水井工事があることによって、これだけの移動量が軽減されたことを示しています。

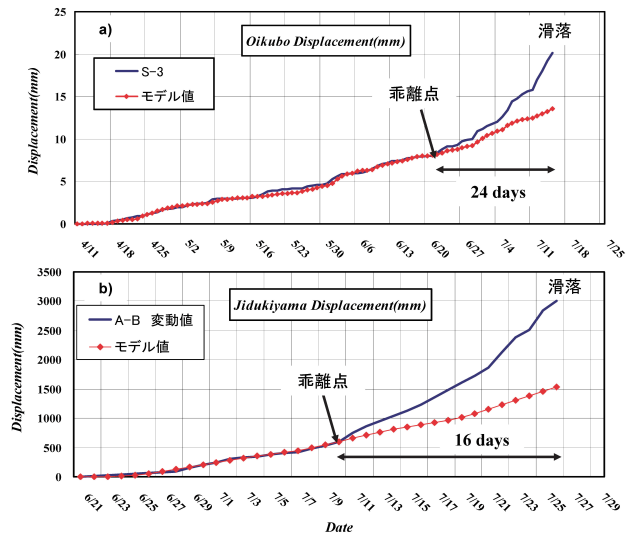
さて、このように一旦、その降水量→水位→間隙水圧

図－6 実効雨量＋LMDMによる対策工効果評価例⁵⁾

→移動量になるモデル化が上手くいけば、その対策工終了後の間隙水圧をモデル化して、それを多年度の気象データを使って極値解析します。つまりグンベル法、ハイズンプロットなどの確率計算手法を使って再現確率を計算します。検討すべき極値降水量がもたらしたら、変動期間の気象ケースとの対比で何倍すれば極値をモデル化できるか分かります。その後は、その実効降雨分布を引き延ばしてモデルに入れます。対策工後のモデルと対策前のモデルが出来れば対策工効果として、安全率上昇のみならず移動量の低下効果を示すことが出来ます。もし検討すべき極値（例えば超過確率1/100）で変動しないとしたら何年確率の降雨応答間隙水圧であればどれくらいの変動量になるのかのインデックスを作ることが可能となります。ちなみに図－6のケースでは実効雨量の計算結果をグンベル法で極値解析した結果、集水井工有・杭対策工なしの条件で、超過確率1/500のとき74cmほどの累積変位の可能性が、杭を足すことによって2cmまで小さくなるという結果が得られました。

3.2 滑落可能性判断のための予備モデル

実は、LMDM開発のきっかけはクロアチア国にあるザグレブ市のコスタニェック地すべりで水位上昇に伴い移動が急激に進行したことに端を発します¹⁾。福園式などの3次クリープモデルで計算した結果では、問題発見の端緒から1～2ヶ月後に滑落する可能性が指摘されましたが、最終的には滑落には至りませんでした。この水位変動を使って開発したLMDMでモデル化したところ地すべり沈静化の理由が簡単に判明しました。つまり、降雨も少なくなり水位が低下したことで地すべりは次第に沈静化したわけです。福園式にしる斎藤式にしる刻々

図－7 追久保地すべり、地付山地すべりのLMDM⁶⁾

と変化する変位速度と時間をサンプリングして滑落予測するものですが、降雨による水圧の変化などの外的加速要因を考慮していません。最初からLMDMモデルで解析していたら、そんなに大慌てになることも無かったのかもしれない。ボーリング孔などの孔内水位が得られないケースでは3.1で述べた、実効雨量やタンクモデルを使えば良いでしょう。滑落するケースではこのモデル式で途中まで計算値が観測値を追従して変動するものの途中から乖離して観測値が計算値を上回るケースが出ます。この乖離点が出てくると地すべりが急変しつつあることを示します。

宮城県の追久保すべりのケース（図－7a）では、タンクモデルとLMDMでモデル化した結果、伸縮計変動とモデル値との乖離点から24日後の2007年7月15日に大変動しました。この結果、地すべりは30m近く滑落し河川を埋積させました。

他方、長野の地付山地すべり（図－7b）では1985年7月26日に大変動し、26名の人命が亡くなる大規模な地すべりでしたが、これをタンクモデルとLMDMにより移動再現を試みた結果、同じように大変動の16日前に乖離点が認められました。そのほかの事例などを参考にしても乖離点が確認されてから滑落まではおよそ2週間から1ヶ月くらいの猶予があるようです。

4. おわりに

移動速度に最も大きく寄与しているものとして、粘性抵抗とすべり面構造（変形層厚）があると思われます。それらがダンパーとなって速度に比例し2次クリープを制御しているのがLMDMの仕組みです。ただし、ここでは述べませんでしたが事例によっては、微視的に見ると「水位応答挙動での時間的な遅れ」や「ヒステリシスのような減速時、加速時の応答差」などの問題もあります。また、破壊に至るモデル化に関して、Cd値の粘性抵抗にはある速度以上でのチキソトロピックな低減の可

能性もあります⁶⁾。この Cd 値の低減を関数化することで、破壊モデルまでの全プロセスをLMDMだけで説明することも可能になるかもしれません。長期安定性評価問題での活用もまだ緒に就いたばかりですが、LMDMでの検討事例が増えていくことでより明確な課題点も見えてくることでしょう。ぜひ、地すべりが変動している現場においてLMDMをご活用ください。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 濱崎英作, 丸井英明, 古谷元 (2016): 質点系ダンパーモデル (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, 流域保全学研究部門年報No. 3, pp. 213-316.
- 3) 檜垣大助, 丸山清輝, 吉田克美, 吉松弘行 (1991): 地すべり地における間隙水圧変動の観測, 地すべり, Vol. 28, No. 3, pp. 9-16.
- 4) 榎田充哉 (1992): 地すべり地における水位変動のモデル解析, 地すべり, vol. 29, No. 2, pp. 28-38.
- 5) 江藤大, 上妻良昌, 大鶴泰史, 濱崎英作 (2019): 日連続安定計算に基づく集水井対策の効果評価その2-実効雨量法と質点ダンパーモデル (LMDM) を使って-, 第58回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 85-86.
- 6) 濱崎英作, 丸井英明, 池田浩二, 山邊康晴, 古谷元, 石川晴和 (2019): 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, 日本地すべり学会誌, Vol. 56, No. 2, pp. 13-20.