

地すべりの崩壊時期予測法の改良について

鉄建建設(株) 正会員 ○植村 義幸, 村岡 亜美, 舟橋 孝仁, 中原 法久, 梨本 裕, 須志田 藤雄

1. はじめに

第3次クリープ段階にある地すべりに対して、斎藤¹⁾²⁾により崩壊時期予測法が提案されている。現在まで広く適用され、高く評価されているが、その適用は第3次クリープ段階後半の直前予測に限定すべきとの指摘³⁾もある。

林ら⁴⁾は、崩壊実験により、第3次クリープの崩壊過程には2つの段階があり、第I段階に比べて第II段階の時間領域は小さく、斎藤法の適用域は後半の第II段階であることを示した。

そして、2つの段階を連続したものとして表すために新たな構成方程式を提案し、式に含まれる2つの係数を変位の計測結果から求めることができれば、崩壊時期を予測することが可能となると結論付けたが、まだその検証はなされていない。

ここでは、変位の計測結果から構成方程式の係数を求める方法を検討する。

2. 林らによる崩壊時期予測法

(1) 変位に関する解析解

林らは、崩壊実験により、第3次クリープの崩壊過程には2つの段階があり、第I段階の挙動は式(1)、第II段階は式(2)で表現できることを明らかにした。

$$\text{第I段階: } dv/dt = a \cdot v \quad (1)$$

$$\text{第II段階: } dv/dt = b \cdot v^2 \quad (2)$$

そして、二つの段階を連続したものとして表すために次の構成方程式(林モデル)を提案した。

$$dv/dt = a \cdot v + b \cdot v^2 \quad (3)$$

ここに、 v : 速度 a, b : 係数(定数) t : 第3次クリープ発生後の経過時間 である。

2つの係数を変位の計測結果から求めるために、式(3)から変位に関する解析解を導出する。

式(3)を次のように積分すると、

$$dv/(a \cdot v + b \cdot v^2) = dt \quad (4)$$

$$[1/v - 1/(v + a/b)] \cdot dv = a \cdot dt \quad (5)$$

$$\text{Ln}[v/(v + a/b)] = a \cdot t + C \quad (6)$$

ここに、 C : 積分乗数 である。

$t = tr$ で $v = \infty$ とすれば、

$$C = -a \cdot tr \quad (7)$$

なので、

$$\text{Ln}[v/(v + a/b)] = -a \cdot (tr - t) \quad (8)$$

$$v = dx/dt = (a/b) / [e^{a \cdot (tr - t)} - 1] \quad (9)$$

となる。ここに、 x : 第3次クリープ変位 である。

$$y = e^{a \cdot (tr - t)} - 1 \quad (10)$$

と置けば、

$$dy/dt = -a \cdot e^{a \cdot (tr - t)} = -a \cdot (y + 1) \quad (11)$$

となるので、式(9)に式(10)と式(11)を代入して積分すると、

$$\begin{aligned} dx &= (a/b) \cdot dt/y \\ &= -1/b \cdot [1/y - 1/(y + 1)] \cdot dy \end{aligned} \quad (12)$$

$$x = -(1/b) \cdot \ln(y/(y + 1)) + C \quad (13)$$

$t = 0$ で $x = 0$ とすれば、

$$C = (1/b) \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/e^{a \cdot tr}] \quad (14)$$

$$x = (1/b) \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/(e^{a \cdot tr} - e^{a \cdot t})] \quad (15)$$

が得られる。

(2) 変位の計測結果を再現する曲線

a の値を設定し、計測結果の再現曲線が通過すべき基準点を2つ選定すれば、残りの係数 b と tr を同定することができる。

2つの基準点 (t_1, x_1) 、 (t_3, x_3) の座標を式(15)に代入する。

$$x_1 = (1/b) \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/(e^{a \cdot tr} - e^{a \cdot t_1})] \quad (16)$$

$$x_3 = (1/b) \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/(e^{a \cdot tr} - e^{a \cdot t_3})] \quad (17)$$

式(16)と式(17)から b を消去すると未知数が tr だけの方程式(18)が得られる。

$$\begin{aligned} x_1 \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/(e^{a \cdot tr} - e^{a \cdot t_3})] \\ - x_3 \cdot \text{Ln}[(e^{a \cdot tr} - 1)/(e^{a \cdot tr} - e^{a \cdot t_1})] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)の左辺を $F(tr)$ とし、 $F(tr)$ を 0 にする tr を2分法⁵⁾により求める。その手順は以下に示すようになる。

① $F(tr_L) \times F(tr_U) < 0$ を満足する tr の区間下限値

キーワード 地滑り, 斜面崩壊の予測, 第3次クリープ

連絡先 〒101-8366 東京都千代田区神田三崎町 2-5-3 鉄建建設(株) 土木本部 TEL: 03-3221-2298

tr_L と区間上限値 tr_U を設定する. 解は $tr_L < tr < tr_U$ の区間に存在する.

- ② 下限値 tr_L と上限値 tr_U の中間値 tr_M に対応する $F(tr_M)$ を計算する.
- ③ $F(tr_L) \times F(tr_M) < 0$ であれば, 解は $tr_L < tr < tr_M$ の区間に存在するので, 中間値 tr_M を新たな上限値 tr_U として④へ進む.
 $F(tr_L) \times F(tr_M) > 0$ であれば, 解は $tr_M < tr < tr_U$ の区間に存在するので, 中間値 tr_M を新たな下限値 tr_L として④へ進む.
- ④ tr の下限値 tr_L と上限値 tr_U の差が十分に小さくなったかどうか確認する. 十分小さくなった時, 両者の中間値 tr_M が求める tr である. 不十分の時は②へ戻る.

この数値計算を a の値を変化させて繰り返し, $x(t_2)=x_2$ になる a を求める. この a の値に対応する tr が崩壊予測時期である.

なお, 2 分法を採用したのは、Newton-Raphson 法⁵⁾などに比べて効率は劣るものの, 計算手順が単純で, 確実に解が求まることを重視したからである.

3. 地すべり事例への適用

図-1 に土讃線⁶⁾の計測結果に対する再現曲線を示す. 通過基準点は12時間と19時間後の計測結果とした. a の値を 0.1~0.01 まで変化させても, 通過基準点までの再現曲線はほとんど変化しない. しかし, 基準点以降は大きく変化する. $a=0.1$ と設定すると, 変位は予測できるが, 崩壊時期は予測できない結果となる. $a=0.06$ と設定すると, 変位は予測できない

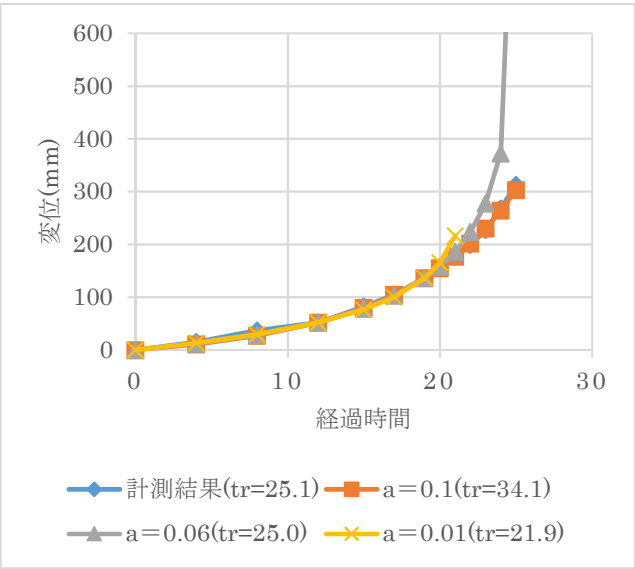


図-1 地山変位測定結果の再現

表-1 計測結果を再現できる a

崩壊事例	a	
	崩壊時期	変位
飯田線 ¹⁾	0.01	0.01
土讃線 ⁶⁾	0.06	0.1
安居山 ²⁾	0.045~0.046	0.045~0.046
実験 A ⁷⁾	0.0021	0.0021
実験 B ⁷⁾	0.00015	0.00136

が, 崩壊時期は予測できる結果となる.

他の事例^{1),2),6),7)}でも同様の検討を行った. すべての事例において, a の値を変化させても, 通過基準点までの再現曲線はほとんど変化しないが, 基準点以降は大きく変化する結果となった.

それぞれの事例において崩壊時期を正しく予測する a の値と変位を正しく予測する a の値は表-1 に示す結果となった. それらの値は事例によって大きく異なることが分かる.

以上より, 第 3 次クリープの第 I 段階の計測結果から林モデルのクリープ係数を求めることは困難であり, 将来変位と崩壊時期を予測するためには, さらなる工夫が必要だと考えられる.

参考文献

- 1) 斎藤迪孝：第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予測, 地すべり, Vol.4, No.3, pp.1-8, 1968
- 2) 斎藤迪孝：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, 1987
- 3) 林拙郎, 駒村富士弥, 朴甫源：斜面崩壊発生時期の予測について—斜面崩壊の経時進行過程—, 地すべり, 第 24 巻, 第 4 号, 1988
- 4) 林拙郎, 川邊洋：斜面崩壊に至るスライドの加速モデル, 地すべり, 第 32 巻, 第 2 号, 1995
- 5) 川崎晴久：C&FORTRAN による数値解析の基礎, 共立出版, 1993.5
- 6) 藤平大, 竹下航, 石井靖雄, 西井稜子, 杉井良平, 森永高行：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と地すべりの崩壊事例, 土木研究所資料, 第 4378 号, 2018.9
- 7) 渡邊聡, 岩田直樹, 中井真司, 笹原克夫：砂質模型斜面における崩壊検知のための計測機器の精度について, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.2, pp.111-121