■地すべりの変位速度と間隙水圧の関係について

On the relationship between displacement rate of landslide and pore water pressure

川邊 洋* Hiroshi KAWABE / 新潟大学名誉教授 Professor Emeritus, Niigata University

キーワード：地すべり変位速度，間隙水圧，レオロジーモデル，粘弾性体，運動方程式

Key words : displacement rate of landslide, pore water pressure, rheology model, viscoelastic body, equation of motion

1. はじめに

降雨，地下水あるいは間隙水圧と地すべり活動が密接な関係にあることは，従来から多くの報告で指摘されている。実際の地すべりを対象とした場合は，ある程度の期間（たとえば，日～月単位）の変位量と降雨量（あるいは平均地下水位）を対比し，両者に指数関係（たとえば最近では，神原（2017））や直線関係（たとえば最近では，紺野ほか（2017））を想定することが多い。

筆者は以前，自然地盤に人為的に地すべりを発生させる野外実験を行い，その観測結果に若干の考察を加えて報告した（川邊ほか，1990）。上記のように日単位程度になると，降雨や地下水位と地すべりの変位量の間に相関が認められるのであれば，間隙水圧（あるいはその変動）と変位量（あるいはその速度）を逐次追跡していても，タイムラグはあるかもしれないが，両者に相関が見られると考え，上記野外実験における間隙水圧と変位量の関係に注目して検討を加えた（川邊ほか，1991）。

その後，この種の問題に関して多数の観測や実験が行

われ，実験式や経験式が報告されている。一方で，地すべりの運動学的な考察も行われてきた。間隙水圧の上昇をせん断抵抗力の減少とみなした場合，地すべりの運動学的解釈とどのように結びつくのか，すなわち間隙水圧と地すべり変位量の関係式にはどのような運動学的意味が含まれているのか，などを明らかにするため，ここに再度考察を行った。

2. 間隙水圧と地盤の変位（観測結果の整理）

図－1 は各種計測器の設置位置を示した平面図（川邊ほか，1990）である。間隙水圧としては間隙水圧計WP 3（－3 m）の測定値，ひずみ速度（変位速度をせん断変形層の厚さで除した値）としては光波測量用移動杭F 2の変位量を用いる。両者は8 mほど離れているが，以下の理由から採用した。

3 箇所 3 深度の間隙水圧計の中で，変位区域内且つ変位土塊内に設置されているものは，WP 3（－3 m）のみであった。また変位量については，F～I列の移動杭

図－1 試験地平面図（川邊ほか，1990）

* 連絡著者 / corresponding author
〒242-0005 大和市西鶴間7-4-22
7-4-22, Nishi-Tsuruma, Yamato-city, 242-0005

図-2 間隙水圧とひずみ速度の関係 (川邊ほか, 1991)

がよく似た動きを示していることと、とくに、移動杭F2とH3, 伸縮計S1とS2, 孔内傾斜計I3による地表面変位量がよい一致を示していることから、F2の値で代表させた。

図-2はWP3 (-3m)の間隙水圧と光波測量用移動杭F2のひずみ速度の関係を示したものである。間隙水圧とひずみ速度の間にタイムラグはないものと仮定している。

間隙水圧が18kPa程度を超えると地盤は変位し始め、20kPaを超えるとその速度は急激に増大する。ひずみ速度は間隙水圧が上昇すると指数関数的に増大し、その関係は次式で表される (相関係数0.931)。

$$\ln(d\gamma/dt) = 0.581 \cdot u - 19.8 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $d\gamma/dt$ はひずみ速度(1/hr)、 u は間隙水圧(kPa)である。(1)式による計算値を図-2に実線で示している。

また、図-2の間隙水圧が20kPa以上の範囲を直線で近似すると、次式ようになる (図-2の破線、相関係数0.865)。

$$d\gamma/dt = 4.58 \times 10^{-4} \cdot u - 9.06 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (2)$$

3. 間隙水圧と地盤のひずみ速度の関係

川邊ほか(1990)では、間隙水圧が比較的小さく地盤変位が穏やかな時期はVoigt物体としての動き、間隙水圧が大きくなり地盤変位が激しくなるとBingham流動として近似できることを示した。

$$\text{Voigt物体} \quad \tau = G \cdot \gamma_1 + \eta_1 \cdot (d\gamma_1/dt) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Bingham流動} \quad \tau = \tau_0 + \eta_2 \cdot (d\gamma_2/dt) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 γ_1 , γ_2 はせん断ひずみ、 τ はせん断応力、 G はせん断弾性係数、 τ_0 は降伏応力、 η_1 はずり粘性係数、 η_2 は塑性粘性係数である。なお、(3)式は変位開始時を $t=$

0, $\gamma_1=0$, (4)式は変位速度が増加傾向に転じた時点を変えて $t=0$, $\gamma_2=0$ と置いている。

間隙水圧 u によるせん断抵抗力の減少、すなわち、結果的にせん断応力の増加は $u \cdot \tan\phi$ (ϕ :内部摩擦角)で表されるので、(3), (4)式を次のように書き換えることができる。

$$\tau + u \cdot \tan\phi = G \cdot \gamma_1 + \eta_1 \cdot (d\gamma_1/dt) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau + u \cdot \tan\phi = \tau_0 + \eta_2 \cdot (d\gamma_2/dt) \quad \dots\dots\dots (6)$$

粘弾性体の運動を表す方程式は、質量項(加速度項)、粘性項(速度項)および弾性項(変位項)の和で表される。Voigt物体としての動きを表す(5)式は、土塊の加速度は非常に小さいとして加速度項を無視した運動方程式に相当する。また、Bingham流動を表す(6)式は、加速度項に加えて、さらに弾性係数も小さいとして変位項も無視した運動方程式に該当する(榎田ほか, 1994)。

Bingham流動を表わす(6)式を変形すると次式が得られる。

$$d\gamma_2/dt = (\tan\phi/\eta_2) \cdot u - (\tau_0 - \tau)/\eta_2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-2で直線とみなした部分((2)式)は、(7)式と同形である。すなわち、土塊の変位速度と間隙水圧が直線関係にあることと、土塊の変位が加速度と弾性係数を無視した運動方程式に従うこととは等価であるとみなすことができる(ただし、土塊の駆動力に間隙水圧が関わっている場合である)。

(2), (7)式より、川邊ほか(1990)の野外実験では、係数は次式のようにになる。

$$\begin{aligned} \tan\phi/\eta_2 &= 4.58 \times 10^{-4} \\ (\tau_0 - \tau)/\eta_2 &= 9.06 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

内部摩擦角の実験地での実測値 $\phi=13^\circ$ を用い、駆動力を間隙水圧関係のみ($\tau=0$)とすると、塑性粘性係数 $\eta_2=1.8 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、降伏応力 $\tau_0=4.6 \text{ kPa}$ となる。

4. おわりに

自然地盤に人為的に地すべりを発生させる野外実験で得られた、間隙水圧と地盤の変位速度の関係を再検討した。その結果は以下の通りである。

1) ひずみ速度 $d\gamma/dt$ と間隙水圧 u の間には、次のような指数関係が見られる。 a, b は定数である。

$$\ln(d\gamma/dt) = a \cdot u - b$$

2) 間隙水圧が大きくなり、それに伴い地すべりの変位速度が急増する段階になると、地すべりのひずみ速度と間隙水圧の関係は次のような直線関係で近似される。

$$d\gamma/dt = a \cdot u - b$$

3) これは地すべり運動をBingham流動とみなした

次式に該当する。

$$dy/dt = (\tan\phi/\eta) \cdot u - (\tau_0 - \tau)/\eta$$

両式より、 $a = \tan\phi/\eta$, $b = (\tau_0 - \tau)/\eta$ である。

4) Bingham流動は、加速度項と弾性項（変位項）を無視した土塊の運動方程式と等価である。

5) Voigt物体の動きを表す(5)式は、加速度項を無視した土塊の運動方程式に相当する。そこでの間隙水圧と地盤変位との関係は、(5)式の両辺を時間微分し（ τ , ϕ , G , η は一定とする）、加速度項を無視した次式より、ひずみ速度（変位速度）と間隙水圧変動速度は線型関係にある。

$$d\gamma_t/dt = (\tan\phi/G) \cdot (du/dt)$$

さらにこのことは、間隙水圧が比較的小さく地盤変動が穏やかな段階では、ひずみ（変位量）と間隙水圧が線型関係にあることを示唆しているのかもしれない。

6) 間隙水圧とひずみ速度の指数関数的関係を表す(1)式の力学的背景については、今後の検討課題である。

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.
- 神原規也（2017）：地すべり変位速度と孔内水位の指数関数的相関関係，第56回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 54-55.
- 川邊 洋・芝野博文・西尾邦彦・山口伊佐夫（1990）：野外実験による地すべり発展過程における地盤の変形特性，地すべり，Vol. 27, No. 1, pp. 1-10.
- 川邊 洋・芝野博文・西尾邦彦・山口伊佐夫（1991）：地すべり地盤の変形に及ぼす間隙水圧の影響についての一考察，地すべり，Vol. 27, No. 4, pp. 33-36.
- 紺野道昭・吉迫 宏・井上敬資・正田大輔・中里裕臣・樺元淳一（2017）：山形県七五三掛地区における地下水位と地すべり変位速度の関係の一次関数モデル，第56回日本地すべり学会研究発表会講演集，pp. 97-98.
- （原稿受付2017年12月5日，原稿受理2018年1月27日）