

II-1 側方流を考慮した斜面崩壊の発生機構

岐阜大学 学生員 後藤 功次
愛知県庁 山崎 澄人
岐阜大学 正 員 田中祐一朗

1. 研究目的

わが国では、毎年のごとく気象災害が発生し、それによる被害は甚大である。その中でも特に被害が著しいものとして集中豪雨時の斜面崩壊による災害が挙げられる。

そこで本研究は、斜面崩壊が最も発生し易いと思われる、V字型斜面における崩壊発生条件式を明らかにすることにより、斜面崩壊発生の予知技術の確立に役立てようとするものである。

2. 側方流を考慮した地下水面方程式

図-1に示すようなV字型斜面モデルを考える。昨年までの研究¹⁾で、無限斜面では、地下水面形は斜面上端付近を除いて、基面に平行となることが明らかとなっている。これは、V字型斜面においても適用できると考えられるので、ZX断面における地下水深は一定であると考えられる。そこで以後、図-2に示すようなZY断面における、斜面基盤上に形成される地下水面形について考えることにする。

①初期のときの地下水深

雨水の浸透水が、基面に到達する直前を $t=0$ とすると、その時からほんのわずかな時間 $\Delta t=1$ 秒後の地下水面形は図-2-①のように基面に平行になるとする。 $r < k$ の場合降雨はすべて地中に浸透するものとして、V字型中央の地下水深は次のようになる。

$$H=ht \quad (1)$$

さらに $\Delta t=1$ 秒後では、これまでに形成されている地下水深による側方流により、V字型中央付近に地下水が流入し、そこで重力に対して垂直に水面形をつくる。さらに、その上に $\Delta t=1$ 秒の間に鉛直上方から浸透する雨水によって形成される地下水深を加え、V字型中央の地下水深 H は、次の式のようになり、図-2-②のようになる。

$$H=rt+H' \quad (2)$$

ここで、

$$\frac{H'^2}{2} \left(\frac{1}{I_{y1}} + \frac{1}{I_{y2}} \right) = (q_{y1}(t=2) + q_{y2}(t=2)) \Delta t \quad (3)$$

$$q_{y1}(t=2) = k I_{y1} h(t=1) \quad (4)$$

$$q_{y2}(t=2) = k I_{y2} h(t=1) \quad (5)$$

であるので、 H' は、

$$H' = \sqrt{2k I_{y1} I_{y2} h(t=1)} \quad (6)$$

となり、 H は次のようになる。

$$H=rt + \sqrt{2k I_{y1} I_{y2} h(t=1)} \quad (7)$$

②任意の時刻 $t=T_j$ の時の地下水深

式(3)をもとにすると、 $t=T_j$ の時は次のようになる。

$$\frac{H'^2}{2} \left(\frac{1}{I_{y1}} + \frac{1}{I_{y2}} \right) = \sum_{i=1}^j (q_{y1}(t=i) + q_{y2}(t=i)) \Delta t_i \quad (8)$$

$$T_j = \sum_{i=1}^j \Delta t_i \quad (9)$$

となり、任意の時刻 $t=T_j$ の時の側方流は

$$q_{y1}(t=T_j) = k I_{y1} h(t=T_{j-1}) \quad (10)$$

$$q_{y2}(t=T_j) = k I_{y2} h(t=T_{j-1}) \quad (11)$$

となる。式(8)に式(10)、(11)を代入し整理すると次のように

$$H' = \sqrt{2k I_{y1} I_{y2} \sum_{i=1}^j h(t=i-1) \Delta t_i} \quad (12)$$

となり、任意の時刻 $t=T_j$ の時のV字型中央の地下水深 H_j は、次のようになる。

$$H_j = r T_j + \sqrt{2k I_{y1} I_{y2} \sum_{i=1}^j h(t=i-1) \Delta t_i} \quad (13)$$

ここで、式(13)の $\sum h$ の h は、 $r < k$ の場合のみを考えると降雨はすべて浸透するので、 $h=r t$ となる。

$$\sum_{i=1}^j h(t=i-1) = \sum_{i=1}^j r t_{i-1} \cdot \Delta t_{i-1} = \frac{r}{2} \cdot T_j T_{j-1} \quad (14)$$

となり、式(13)、(14)より

$$H_j = r T_j + \sqrt{k r I_{y1} I_{y2} T_j T_{j-1}} \quad (15)$$

となり、これによりV字型中央での水深 H の時間的变化が明らかになる。

3. 斜面崩壊条件式

昨年までにクーロンの崩壊条件式をもとに得られた式

$$H_j = \frac{C' \sec \theta_x - D \gamma_t (\tan \theta_x - \tan \phi)}{(\gamma_{sat} - \gamma_t) \tan \theta_x + (\gamma_t - \gamma_{sub}) \tan \phi} \quad (16)$$

に、式(15)を組み込むことにより、次の斜面崩壊条件式が得られる。

$$\begin{aligned} & r T_j + \sqrt{k r I_{y1} I_{y2} T_j T_{j-1}} \\ & \geq \frac{C' \sec \theta_x - D \gamma_t (\tan \theta_x - \tan \phi)}{(\gamma_{sat} - \gamma_t) \tan \theta_x + (\gamma_t - \gamma_{sub}) \tan \phi} \quad (17) \end{aligned}$$

しかし、この条件を満たしても崩壊が発生しない時がある。それは、降雨強度がある一定値よりも小さいとき、斜面の末端より流出する流量が、降雨により浸透する流

量より大きい場合である。そこで、地下水深が上昇する条件を組み込む必要がある。降雨によって鉛直下方に浸透する水量は単位時間当たり、

$$Q = r L_y \cos \theta_x (L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2}) \quad (18)$$

となり、ZY断面から斜面下方へ流出する総流量は、

$$Q_a = k I_x \int H_y dy \quad (19)$$

となる。ここで、 $\int H_y dy$ は図-3で示すようにZY断面における地下水の断面積であるので次のように表せる。

$$\begin{aligned} \int H_y dy &= S_1 + S_2 \\ &= r T_j (L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^j (k I_{y1} h(t-i-1) + k I_{y2} h(t-i-1)) \Delta t_i \quad (20) \end{aligned}$$

$$= r T_j (L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2}) + k/2 (I_{y1} + I_{y2})$$

よって、 Q_a は次式のようになる。

$$Q_a = r k I_x \{ T_j (L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2}) + k/2 (I_{y1} + I_{y2}) \} \quad (21)$$

地下水深が上昇するために $Q > Q_a$ の条件を満足させる必要がある。よって、これに Q 、 Q_a を代入し、整理すると

$$L_x \geq k \frac{\sin \theta_x}{\cos^2 \theta_x} \left(T_j + \frac{k(I_{y1} + I_{y2})}{2(L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2})} \right) \quad (22)$$

となる。式(17)、(22)の条件を同時に満たすとき、斜面崩壊が発生すると考えられるので、両式を組み合わせて整理すると次のような斜面崩壊条件式になる。

$$\begin{aligned} L_x \geq k \frac{\sin \theta_x}{\cos^2 \theta_x} &\left(T_j + \frac{k(I_{y1} + I_{y2})}{2(L_{y1} \cos \theta_{y1} + L_{y2} \cos \theta_{y2})} \right) \\ &\cdot \frac{1}{r T_j + (k r I_{y1} I_{y2} T_j T_{j-1})^{1/2}} \\ &\cdot \frac{C' \sec \theta_x - D \gamma_t (\tan \theta_x - \tan \phi)}{(\gamma_{sat} - \gamma_t) \tan \theta_x + (\gamma_t - \gamma_{sub}) \tan \phi} \quad (23) \end{aligned}$$

4. 崩壊事例への適用性と考察

昭和57年の台風10号のもとでの小黒川流域の観測記録(図-4)²⁾を用い、求めた地下水面方程式の妥当性を検討した結果を図-5に示す。単純な斜面モデルでの理論式を、そのまま複雑な実際の降雨のもとでの、複雑な実際の斜面での観測記録との適合性を検討したところ、多少の無理はあったものの、計算結果と観測記録との間に大きな違いは見受けられなかった。また、(23)式は平板型斜面においても適用でき、側方流に関する項が加わった分、崩壊が生じ易いことを表している。適用事例が少なく、この結果だけから判断することは危険ではあるが、V字型地形での実験は簡単に行うことができない現状では、今後もこうした事例を数多く集めていく必要があるが、大筋においては妥当な結果を与えるものと考えられる。

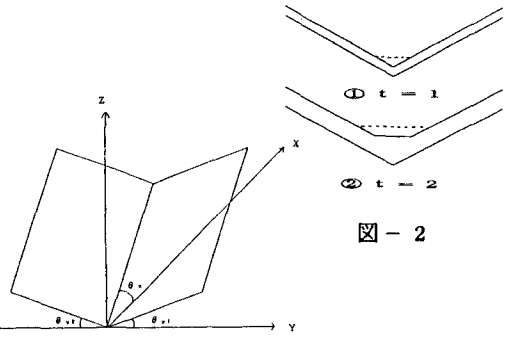


図-1

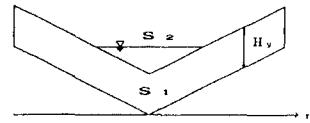


図-3

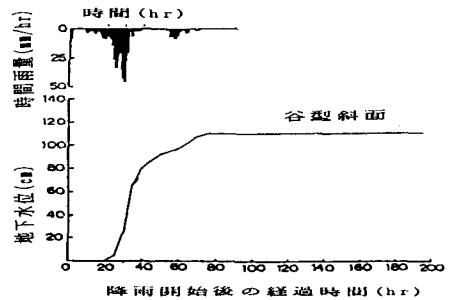


図-4

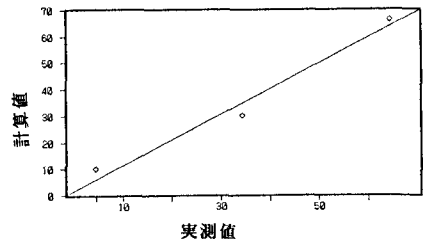


図-5

(参考文献)

- 1) 藤岡一類: 降雨による斜面崩壊の発生機構に関する研究: 岐阜大学卒業論文: 1989
- 2) 平松晋也、水山高久、石川芳治: 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊の発生予測に関する研究: 新砂防Vol. 43: 1990