

図-1 斜面の滑り崩壊

このところ時間雨量100mmに達する強い雨が珍しくなくなった。今年7月初めに起きた熱海の土石流の主人公は谷上部斜面の盛り土であることに間違いはない。それまで安定していた斜面の崩壊は、重力に逆らった状態に置かれた土が、何らかのスキを突かれてしまうために起こる。スキに当たるのは以下の原因であるが、いくつかが複合することも多い。

- ・斜面地盤の強度低下…風化・軟化の進行、岩の土砂化・ひびわれの発達
- ・幾何形状の悪化…斜面底部の洗掘・切り取りで高さ・傾斜の増、盛り土による高さ増
- ・外力付加…地震力、重量物の载荷
- ・水の影響…表流水による掃流、浸透水による体積力の付荷、浸透水による底部のパイピング

丘陵地の高速道路が供用後によく斜面崩壊するのは、地盤中では固かった古い地層が切り取られて風雨に曝され、膨潤軟化して強度低下するためである。最近、西成区で起こった崖上の家屋倒壊も、硬い洪積層地盤の長年にわたる強度低下に崖下の工事振動が引き金になったと思う。斜面が急角度と高い場合や、地震や载荷重の影響は単純な思考実験で安定を考慮することができる。斜面の崩壊の最も多いのは水に起因している。熱海の斜

面崩壊においても放送で「水抜き」などの言葉が聞こえる。斜面の表面を流れる水が表面を削り取り、下流で積み重なって土石流に発達することは直感的にわかるが、土に染み込んだ水がどのように斜面を不安定化するかは、放送には出てこない。ここでは見えない土中で土に作用して斜面を崩壊させる水の働きを説明したい。

ここでは「土」の斜面を対象にする。ここでいう土は土粒子の集合体で、岩石が風化してできた土砂、それが移動堆積した(若い)地盤、人工の盛り土などを扱う。これらは数万年前の堆積土のように固結していないので、通常、設計には引っ張り強さは持たないとして扱われる。したがって、土の強さは土がずれ動くときのずれ面上の土粒子間の摩擦抵抗(剪断抵抗)で生まれるので、「土の強さ」はずれ面(滑り面)上に垂直に働く圧力と土の摩擦係数で決まる。なお、土は土粒子と水・空気の混合体で、水の浸透や転圧によって空気が追い出されれば土粒子間の空隙が水で飽和する。

土砂斜面の崩壊形態は、長い斜面の場合に地盤強度の低い表層が滑落する表層滑りが多いが、深くまで土が弱い場合は滑り面が円形に近い円弧滑りを生じることが多い(図-1)。

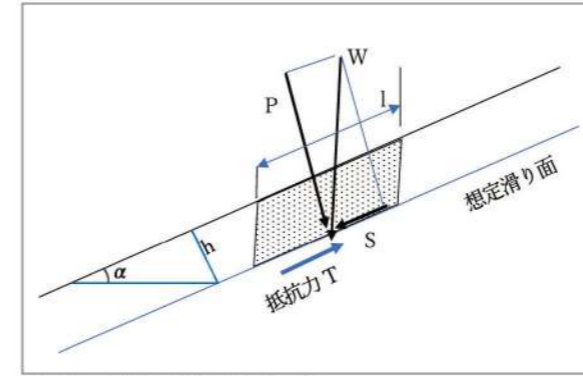


図-2 平面滑りの力学構成(平時)

ここでは水の影響を図-2の傾斜角 α 斜面の2次元表層滑りの場合を説明する。地表に並行な想定滑り面の厚さ h 、切り取った長さ l とすると、その重さ W は面積 $A(=hl)$ に土の単位体積重量 γ_t をかけて求める。この W を斜面に平行する力(S =滑り力)と斜面に垂直な力 P に分解する。すべりに対する抵抗力は土の摩擦係数 μ を用いて μP で表され、安全率 F は抵抗力÷滑り力で表される。三角関数を用いると $S=W\sin\alpha$ 、 $P=W\cos\alpha$ で表せる。傾斜角が増すと $\sin\alpha$ は1.0方向に増え、 $\cos\alpha$ は0方向に減るので安全率は小さくなる。

$$F = \frac{\mu W \cos \alpha}{W \sin \alpha} = \frac{\mu A \gamma_t \cos \alpha}{A \gamma_t \sin \alpha} = \frac{\mu \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (1)$$

斜面角度を $\alpha=20$ 度、土の密度を緩めの $\gamma_t=2t/m^3$ 、土の摩擦係数(砂礫質土で通常0.7~0.9)を低めの $\mu=0.7$ とすれば、

$$F = \frac{0.7 \times 0.94}{0.34} = 1.94$$

となって、安全率は1.0よりも十分大きく、この斜面は安全である。20度の斜面とは河川堤防の勾配よりも少し緩やかである。

次に、長雨が降って斜面全体に染み込んだ水が斜面下方に流れるとはどうなるか(図-3)。日本のような雨の多い所では、乾燥が及ぶ地

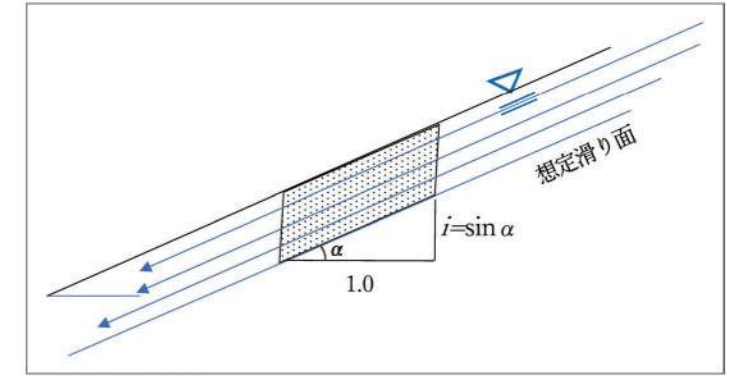


図-3 浸透流の発生

表の数10cmから下の土は水で飽和に近い状態にあるので、長雨が降れば土は容易に飽和状態に近づいて、斜面には図のような浸透流(普通の土で毎秒数ミリ以下の速さ)を生じる。この状態で分母の滑り力は上記と同じ $A\gamma_t\sin\alpha$ 。滑り面上の垂直力は、飽和した土が浮力を受けるので、 $A(\gamma_t-\gamma_w)$ を用いて算出する。 γ_w は水の単位堆積重量($=1.0t/m^3$)である。これらで安全率を表すと、

$$F = \frac{\mu A(\gamma_t - \gamma_w) \cos \alpha}{A \gamma_t \sin \alpha} \quad (2)$$

分子・分母の A は省略でき、上と同じ条件で安全率を算出すると、

$$F = \frac{0.7(2.0-1.0) \times 0.94}{2.0 \times 0.34} = 0.97$$

浸透流が生じると、安全率は大幅に低下して、この斜面は滑るのである。

この算出法には抵抗力の算出に土の浮力を考慮する方法を用いたが、飽和して浮力を受けている土が浸透力で背中を下方に押されると考えることもできる。浸透力というのは、水が土の中を通過するときに土を押す力で、重力と同じ体積力である。その強さ(i)は流れの長さに対する位置エネルギーの低下量(水流の鉛直高さ低下量)に等しいの

で(図-3)、 $\sin\alpha$ と表せる。面積 A の土の体積が受ける浸透力は、 $A\gamma_w\sin\alpha$ である。安全率の算出式の分子は浮力を受けているので式(2)と同じであるが、滑らそうとする分母は、浮力を受けた土の滑り力 $A(\gamma_t-\gamma_w)\sin\alpha$ に浸透力 $A\gamma_w\sin\alpha$ を加えたものになる。

$$F = \frac{\mu A(\gamma_t - \gamma_w) \cos \alpha}{A(\gamma_t - \gamma_w) \sin \alpha + A \gamma_w \sin \alpha} \quad (3)$$

この式を整理すれば、式(2)と全く同じになる。斜面の土が長時間降雨で飽和して浸透流が生じたときに、式(2)は土の滑り抵抗が浮力によって低下するという考え方、式(3)は浸透流が土を押すという考え方で斜面の安全性を表わせる。図-1の円形滑りの場合も地下水位の影響を同様に考慮して安全率を計算する。

天気予報でよく聞く「大雨で地盤が緩んでいるので土砂崩壊に注意」を力学的に説明せよ、という課題はよく試験に出題した。雨の影響を避けるには、斜面に水を入れないこと、入った水は出やすくすることで、様々な対策工法がある。また盛り土は転圧が前提であり、転圧した盛り土は含水量が少なく強いので、壊れても土石流化しにくい。熱海の崩壊事例は、それ以前に無知と無責任が原因というしかない。