

III-105 斜面の破壊確率に及ぼす含水比変化の影響について

名古屋大学 正会員 松尾 総
 名古屋大学 学生会員 桑原 正彦
 名古屋大学 学生会員 〇上野 誠

はじめに、斜面崩壊と降雨との間には強い関連があるが、その詳細な機構は明確でない。降雨による斜面崩壊の機構は非常に複雑であるが、力学的要因としては土の強度低下、自重の増大、間げき圧の上昇が考えられる。本報告は斜面の安定度の変化を、土の強度係数 c 、 ϕ と含水比 w との関係に基づいて検討したものである。このために、まず一面せん断試験によって $w \sim c$ 、 ϕ 関係を求め、同時に別途に室内鉛直浸透実験を実施して任意の浸透時間に対する含水比状態を知ろうとした。つぎに、この2つの実験から得られた $w \sim c$ 、 ϕ 関係および浸透時間 t と w の関係をモデル斜面上に適用し、斜面の安全率と破壊確率の時間的変化を調べた。なお、一面せん断試験、鉛直浸透実験、安定解析の一連の作業を統一的にかつ実際の斜面の状態を可能な範囲で再現するために、試料はすべてシルト質砂の山土($G_s = 2.68$, $(\gamma_s)_{max} = 1.94 \text{ t/m}^3$, $w_{opt} = 11.9\%$)を用い、浸透実験の規模を実際の斜面表層厚との関係より、 1.4 m として、室内と現場において大きな差がないようにした。

$w \sim c$ 、 ϕ 関係：前述の山土を試料として、直径 6 cm の一面せん断試験を行なった。実験条件として初期間げき比 $e_0 = 1.0$ (一定)とし、 w のみを変化させて $w \sim c$ 、 ϕ 関係を求めた。その結果、図1、2のような $w \sim c$ 、 $w \sim \phi$ 関係が得られた。 $w \sim c$ 関係は、図1から推察されるようになり複雑であるが、研究の第一歩として、 $w = 5 \sim 30\%$ の範囲で w と c は放物線的な相関があると考え、次の回帰曲線により近似した。

$$c = 1.75 / -0.157w + 0.0042w^2 \quad (\text{t/m}^2) \quad \text{---(1)} \quad \text{---(1)}$$

一方、 $w \sim \phi$ 関係は図2のように、 w に対して c がかなり明確な直線的減少を示すので、次の回帰直線で表現することにした。

$$\phi = 40.53 - 1.113w \quad (\text{度}) \quad \text{---(2)}$$

式(1)、(2)はある w での c 、 ϕ の平均値を表わし、母集団はこの値のまわりにばらつくものと仮定する。式(1)は c のばらつきが大きいので、精度が高いとはいえないが $c \sim w$ の傾向は知られよう。 c と ϕ のばらつきについては変動係数 V を一定と仮定し、 $V_c = 0.345$ 、 $V_\phi = 0.175$

とおいた(この値は多数回の一面せん断試験から得られたものである)。強度係数 c 、 ϕ の値が w の値によって変化するということは、自然斜面のように降雨浸透の影響を受けやすい土構造物の破壊確率を論ずる場合に、 $w \sim c$ 、 ϕ 関係についての正確な知識の必要性を示唆している。

室内鉛直浸透実験：実験は内径 40 cm 、高さ 1.4 m の円筒に前述の山土を詰め、行なった(図3)。装置上部より市販のノズルによって雨を降らせ、土中に浸透させた。浸透中の含水比は、土中に埋め込んだ電気抵抗式感体によって、浸透時間 t と深さ z に対して測定した。実験条件として間げき比 $e_0 = 1.0$ 、最大浸透深さ $z_{max} = 1.4 \text{ m}$ は同一とし、水の与え方をえて3種の実験を行なった(表1)。感体は円筒中央部に、 20 cm の間隔に設置した。実験より、湿潤前線の進行状況

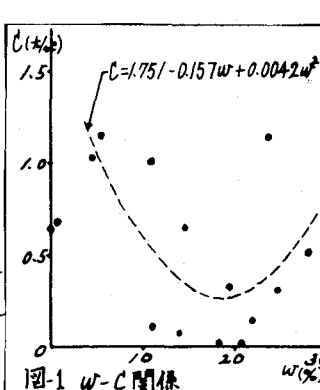


図-1 $w \sim c$ 関係

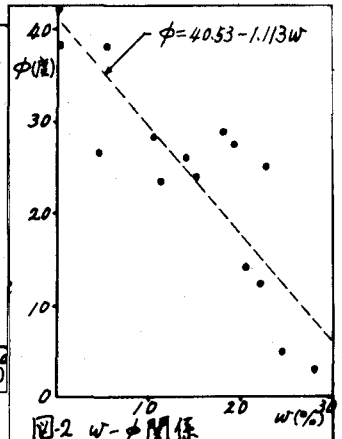


図-2 $w \sim \phi$ 関係

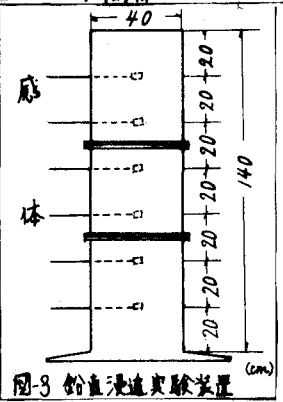
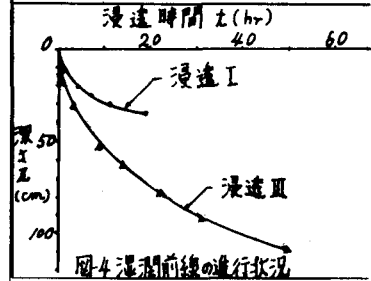


図-3 鉛直浸透実験装置

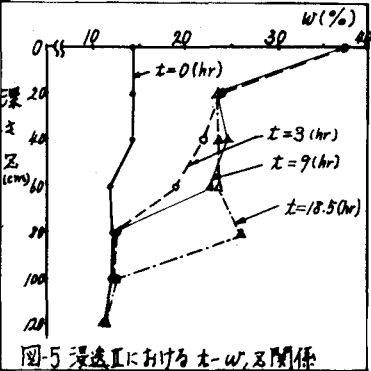
と、 α の関係が得られた(図4, 5 参照)。この結果、浸透に関しては次のことが明らかになった。(i) 湿潤前線の進行は、浸透初期には速く、時間の経過につれてだいに遅くなる。(ii) 鉛直浸透は不能状態で行なわれ、湿潤前線通過後の飽和度は50~70%程度で、あまり変化しない。(iii) 現実の降雨を対象とすれば、降雨浸透が1.4mの深さですで達するにはかなりの時間を要する。(iv) 浸透時間が十分長かつその間に水が供給されるならば、1.4m程度の土層は一様に含水比が上昇する。以上より、斜面崩壊に關する降雨要因としては、雨量強度だけでなく降雨継続時間あるいは浸透時間も重要と考えられる。

表-1 実験に用いた降雨浸透のパターン

浸透	降雨浸透のパターン
I	地表面より水位を一定(10cm)に保ち、54時間浸透を行なう。
II	先行降雨と想定して初期含水比を高くし雨量強度85mm/hrの降雨が連続するこの浸透
III	地下水面が形成されている初期状態で、強度65mm/hrの降雨を19hr連続させて停止し、停止後124hr経過する。



安定解析による斜面の破壊確率の変化について、実験より得られた α と ϕ の関係および α の関係から、モデル斜面の破壊確率 P_f が浸透に伴ってどのように変化するかをシミュレーションによって求めた。モデル斜面として、表層厚1.4m、傾斜角 45° で地表面と基層面が水平かつ平行な無限斜面を設定した。崩壊は表層においてのみ生ずるものと仮定し、鉛直浸透実験との関連から最大のすべり深さは1.4mとした。解析には円弧すべり面法を採用し、土質諸係数 c, ϕ, γ は浸透時間 t と深さ z での α に対応する値を用いた。強度係数 c, ϕ については図6のように、斜面の各メッシュごとに c, ϕ の正規分布からとり出してきた値をわりつけた。そして、ある浸透時間 t において、このわりつけられた c, ϕ の値と γ によって斜面の最小安全率 $\bar{F}_s$ を求め、この操作を100回繰返して得られた100個の $\bar{F}_s$ から平均安全率 $\bar{F}_s$ を求めた。時間 t における斜面の破壊確率 P_f は、100個の $\bar{F}_s$ のうちで値が1.0以下となる $\bar{F}_s$ が出現する確率として定義した。こうして得られた $\bar{F}_s, P_f$ の関係を図7に示す。図7に示されるように、 $\bar{F}_s$ の関係は $\bar{F}_s = 1.0$ 前後の $\bar{F}_s$ の変化が明瞭でなく、 P_f の詳細な変化が分からないので、 $\bar{F}_s = 1.0$ となるぐらいの c, ϕ, γ の値を内挿して安定計算を行ない、 $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係を求めた。そしてこの $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係より斜面の $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係を推定して示したのが図7の破線部である。図7より、浸透Iのように初期含水比の低い斜面では、浸透前の安全率は高いが時間の経過に伴って $\bar{F}_s$ が低下し、 $t = 40 \sim 50$ hrで $\bar{F}_s$ が0~1.0へと急上昇する。したがって浸透Iによれば、斜面は40hrを過ぎると非常に危険になると考えられる。他の浸透II, IIIにおける $\bar{F}_s, P_f$ の関係は、発表時に報告したい。



安定解析による斜面の破壊確率の変化について、実験より得られた α と ϕ の関係および α の関係から、モデル斜面の破壊確率 P_f が浸透に伴ってどのように変化するかをシミュレーションによって求めた。モデル斜面として、表層厚1.4m、傾斜角 45° で地表面と基層面が水平かつ平行な無限斜面を設定した。崩壊は表層においてのみ生ずるものと仮定し、鉛直浸透実験との関連から最大のすべり深さは1.4mとした。解析には円弧すべり面法を採用し、土質諸係数 c, ϕ, γ は浸透時間 t と深さ z での α に対応する値を用いた。強度係数 c, ϕ については図6のように、斜面の各メッシュごとに c, ϕ の正規分布からとり出してきた値をわりつけた。そして、ある浸透時間 t において、このわりつけられた c, ϕ の値と γ によって斜面の最小安全率 $\bar{F}_s$ を求め、この操作を100回繰返して得られた100個の $\bar{F}_s$ から平均安全率 $\bar{F}_s$ を求めた。時間 t における斜面の破壊確率 P_f は、100個の $\bar{F}_s$ のうちで値が1.0以下となる $\bar{F}_s$ が出現する確率として定義した。こうして得られた $\bar{F}_s, P_f$ の関係を図7に示す。図7に示されるように、 $\bar{F}_s$ の関係は $\bar{F}_s = 1.0$ 前後の $\bar{F}_s$ の変化が明瞭でなく、 P_f の詳細な変化が分からないので、 $\bar{F}_s = 1.0$ となるぐらいの c, ϕ, γ の値を内挿して安定計算を行ない、 $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係を求めた。そしてこの $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係より斜面の $\bar{F}_s \sim P_f$ の関係を推定して示したのが図7の破線部である。図7より、浸透Iのように初期含水比の低い斜面では、浸透前の安全率は高いが時間の経過に伴って $\bar{F}_s$ が低下し、 $t = 40 \sim 50$ hrで $\bar{F}_s$ が0~1.0へと急上昇する。したがって浸透Iによれば、斜面は40hrを過ぎると非常に危険になると考えられる。他の浸透II, IIIにおける $\bar{F}_s, P_f$ の関係は、発表時に報告したい。

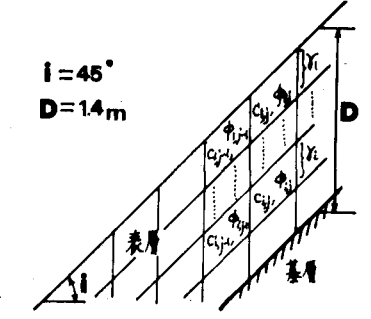


図6. メッシュの c, ϕ のわりつけ

と、 α の関係が得られた(図4, 5 参照)。この結果、浸透に関しては次のことが明らかになった。(i) 湿潤前線の進行は、浸透初期には速く、時間の経過につれてだいに遅くなる。(ii) 鉛直浸透は不能状態で行なわれ、湿潤前線通過後の飽和度は50~70%程度で、あまり変化しない。(iii) 現実の降雨を対象とすれば、降雨浸透が1.4mの深さですで達するにはかなりの時間を要する。(iv) 浸透時間が十分長かつその間に水が供給されるならば、1.4m程度の土層は一様に含水比が上昇する。以上より、斜面崩壊に關する降雨要因としては、雨量強度だけでなく降雨継続時間あるいは浸透時間も重要と考えられる。

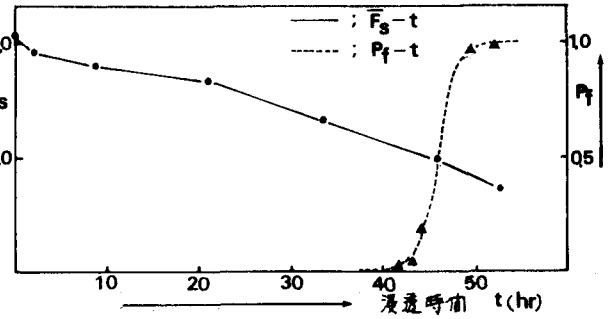


図7 浸透Iにおける $\bar{F}_s, P_f$ の関係

あとがき: 室内実験とシミュレーションによって、モデル斜面の破壊確率の変化を求めた。そして、浸透による含水比変化が斜面の破壊確率に与える影響を及ぼすものであることが分かった。今後は実験を変え、かつ精度の高い実験を行なうと同時に、実際の斜面の調査も併行して斜面崩壊の実態を究明していきたい。