

東京工業大学 正会員 瀧岡 和夫
 同 上 正会員 日野 幹雄
 同 上 学生員 尾高 義夫

1. はじめに

山腹斜面の土壌中には、毛細間隙を通る通常の層流的な浸透流（マトリックス流）だけでなく、パイプと称される連続した大空隙を通る流れ（パイプ流）が存在し、それが降雨に対する流出の応答などに関して重要な影響を及ぼしていることが知られている¹⁾。このパイプの主要な形成要因としては、animal hole や roots hole などが挙げられるが、それ以外にも、水理的な侵食作用によるパイプの形成が考えられる。すなわち、土壌内のある箇所に割れ目や何らかの原因による空隙が発生するとそこに周辺の浸透水が集中し、次第に空隙が成長していく可能性がある。そこで、本報告ではまずその前半で、室内実験により上述の水理的侵食作用によるパイプの発生・成長過程を再現することを試みた結果について述べる。後半では、土壌内に形成されるパイプの径が、降雨強度や斜面勾配あるいは土壌特性などにどのように依存するかということを、簡単なパイプ流のモデルに基づいて検討した結果について述べる。

2. パイプの形成に関する室内実験

(1) 実験装置・方法

実験に用いた装置の概略を図-1に示す。この装置はアクリル樹脂製で、その下流端には図に示すような形で半径1.5 cmの半円形排出口が設けてある。これは、排出口での土壌の空隙がどのように土壌内部に成長していくかを見ようとしたものである。実験に使用する土壌材料としては、平均粒径0.2 mmの細砂およびそれに重量比10%の割合でベントナイトを混入したものの2ケースとした。なお、予備実験の結果、土壌材料の装置内への詰め込み方に不均一性があると実験結果がかなり影響を受けることが明らかになったので、詰め込みに際してはできる限り均等性が保たれるように注意した。

(2) 実験結果

まず、細砂のみの土壌材料のケースであるが、この場合にはここでは示していないが実験開始初期に排出口周辺の砂が半円形に流出し、その後はあまり崩壊が進行しないという結果になった。一方、ベントナイトを混入したケースでは図-2に示すような崩壊部分の進行現象が見られた。この場合の浸透水の流量は、通水開始後10分の時点で64 ml/sであった。このように、砂だけの場合と異なりベントナイトを混入させると空洞部分の進行が見られるということから、パイプの形成に土壌材料の粘着性の効果が重要となることが示唆される。なお、実験では水压の作用で装置の中央部分がわずかながらふくらみ、そこに透水が集中しやすくなるという問題が生じた。今後はこの点を改良すると共に、土壌材料や水理条件を変化させて実験を継続していく予定である。

3. パイプの径の支配要因についての解析

野外で実際に観察されるパイプの径は、直径1~2 cmから数mまでさまざまである¹⁾。ここでは、このパイプの径が、降雨強度や斜面長、斜面勾配、あるいは土壌特性などにどのように依存するかということも簡単なモデル

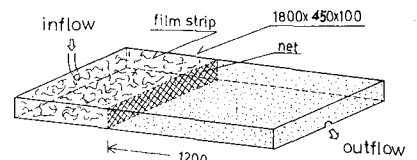


図-1

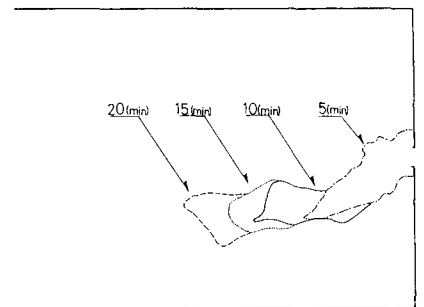


図-2

に基づいて検討する。

まず、図-3に示すような、長さ L 、幅 B 、勾配 $\tan\theta$ の一樣斜面に、強度 r の一樣な降雨がある場合を考える。ここで仮定として、土壤中に浸透した雨水はそこから最も近い距離にあるパイプにまず流出し、その後はパイプ流として流出するものとする。そうすると場所 x での定常状態における流量 $Q(x)$ は、連続式より

$$Q(x) = \frac{x \cdot \cos\theta \cdot B \cdot r}{n} \quad \text{----- (1)}$$

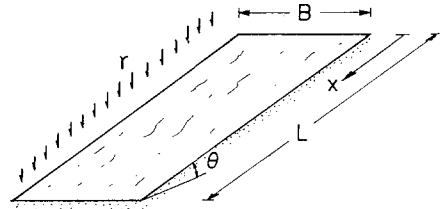


図-3

となる。次に、パイプ内の流れは管径 $D(x)$ 、摩擦係数 f の管路の流れとして記述されうものと考え、その場合のエネルギー式は次のようなる。

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{4}{2g\pi} \frac{Q(x)^2}{D(x)^5} \right\} - i + \frac{f}{D(x)} \frac{4}{2g\pi} \frac{Q(x)^2}{D(x)^4} = 0 \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 i ：動水勾配、 g ：重力加速度。ここで上式において、 $i \approx \sin\theta$ と仮定し、また以後の計算の簡単のために、第三項の $1/D(x)$ の因子を $D(x)$ の平均値 $\bar{D}$ を使って置き換えると、式(2)は式(1)を代入することにより次のように表わせる。

$$\frac{dy}{dx} + \frac{f}{\bar{D}} \cdot y = A \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $y(x) \equiv \frac{x^2}{D(x)^4}$ ----- (4), $A \equiv 2g\sin\theta \cdot \left(\frac{n\pi}{4\cos\theta \cdot B \cdot r} \right)^2$ ---- (5)

そこで、式(3)を境界条件 $y=0$ (at $x=0$) のもとで解くと

$$y = \frac{A\bar{D}}{f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{f}{\bar{D}}x} \right) \quad \text{----- (6)}$$

となる。したがって式(4)、(5)より最終的に次式を得る。

$$D(x) = \left(\frac{f}{2g\bar{D} \cdot \sin\theta} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{n\pi}{4\cos\theta \cdot B \cdot r} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\sqrt{x}}{\left(1 - e^{-\frac{f}{\bar{D}}x} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad \text{----- (7)}$$

上式は右辺に $D(x)$ の平均値 $\bar{D}$ を含むため $D(x)$ に関してはexplicitな表示にはなっていないが $\bar{D}$ の変化は結果にあまり影響を及ぼさない形になっている。式(7)より以下の事がわかる。

- 1) 降雨強度 r の増加に対してパイプの径はほぼ $\sqrt{r}$ に比例して大きくなる。
- 2) 斜面勾配のほぼ $1/4$ 乗に逆比例してパイプの径は小さくなる。
- 3) 斜面頂部からの距離 x が小さいときは $D \propto \sqrt{x}$ で変化し、逆に x が大きいときには $D \propto \sqrt{x}$ で変化する。

図-4は具体的な計算結果として、摩擦係数 f をパラメータにとったときの降雨強度 r の変化に対する D の変化を示したものである。これからここで示したモデルによって、降雨強度が数10 mmのときで数cm、 $r=300$ mm/hr のときでも10~15 cmというほぼ妥当なパイプ径の値が得られることがわかる。図-5は同様にして x を横軸にとったものである。最後に図-6は、横軸にパイプの本数 n をとったときの断面内のパイプの総断面積 $n \cdot A$ (A はパイプ1本あたりの断面積)の変化を示したものである。これから、 n の変化に対して $n \cdot A$ はあまり大きな変化は示さず、またある特定の n で $n \cdot A$ が最小値を示すこともないことがわかる。

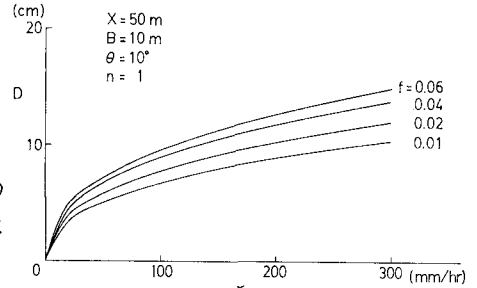


図-4

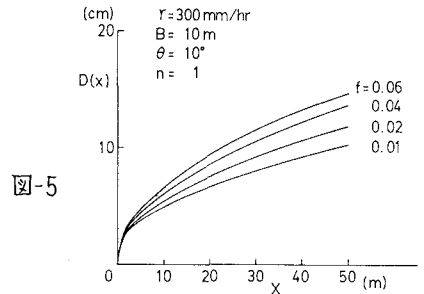


図-5

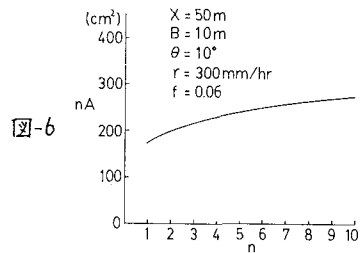


図-6

〈参考文献〉 1) Kirkby, M.J. : Hillslope hydrology, 1978. (「新しい水文学」, 日野ら訳, 朝倉書店)