

土壌内パイプネットワークの水移動に関する基礎的研究

名古屋大学工学研究科 ○ 学生員 鷺見 哲也
 名古屋大学難処理人工物研究センター 正会員 松林宇一郎
 名古屋大学工学研究科 正会員 高木 不折
 名古屋大学工学部 顕原宇一郎

1. はじめに 土壌中の粗空隙が山腹斜面における速い流出に大きく寄与するプロセスには、斜面側方の卓越した水分輸送を行うパイプ流の他に、そこまで速く水分を鉛直輸送するマクロポア流がある。後者について、Beven and Germann¹⁾が Macropore を個々の独立した鉛直パイプにモデル化して論じているが、本研究では粗空隙のネットワークで構成される Macropore を模擬的に作成し、人工散水を与える室内実験を行い、流出の素過程としての表層鉛直浸透現象について考察する。

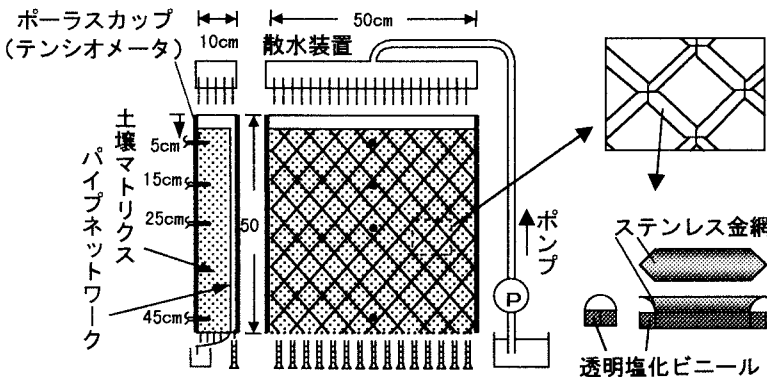


図-1 実験装置の概略

6	6	6	10	6	8	10	6	4	10	8	4	6	4
10	8	6	8	10	8	6	4	10	10	6	10	10	4
8	6	8	6	10	8	6	4	6	10	8	10	4	
4	10	10	8	4	10	6	8	8	4	10	6	4	4
8	6	8	8	8	4	10	6	10	6	8	6	4	10
4	4	4	4	10	8	4	4	10	8	6	6	4	8
4	4	4	8	10	6	10	10	8	10	4	10	10	10
4	6	4	4	6	8	6	4	10	4	10	4	4	10
8	6	8	10	6	8	8	8	6	8	10	10	10	8
6	4	8	10	4	4	6	10	6	10	4	8	4	6
8	6	8	8	4	6	6	10	6	4	6	4	8	8
6	6	4	6	10	8	8	8	8	6	6	10	6	4
4	6	10	10	10	8	4	8	6	10	10	8	10	8
10	4	8	4	8	4	6	4	10	6	10	6	6	8
10	10	4	4	6	8	10	6	10	4	8	4	8	8

図-2 パイプ径の分布(mm)

2. パイプネットワークの室内実験 粗空隙ネットワークを持つ鉛直2次元カラムを図-1のように模擬的に作成した。土壌マトリクスは高さ約50cm、幅50cm、奥行き10cmとし、前面の透明アクリル板の内側にパイプネットワークを張り付けることで、パイプ内の流れの様子が観察できるようにした。ネットワークは、一辺5cmの正方格子を45°回転させたもので、上端と下端は開放されている。上端はマトリクス上端面と同一面にあり、下端出口には各パイプでの累加流量が測定できるようメスシリングを個々の出口に配置した。側面では境界の影響を軽減するために、境界面を対象面とした現象が境界外で起きると仮定し、パイプを折り返しとした。個々のパイプは半円断面とし、円周の壁面にはマトリクス部との水移動を可能とするために0.25mm間隔のステンレス製の網を用い、図-1右下部分の様に透明塩化ビニールの六角形片上に円弧アーチ状に渡して作った単独パイプ片を、前面アクリル板に正方格子状に張り付けて配置し、交点での隙間はガーゼで覆った。一辺のパイプの内径は4, 6, 8, 10mmのものを用意し、各径の総個数がほぼ同数になるようにランダムに図-2の様に配置した。こうしてできた前面部の裏にマトリクス土壌(園芸用赤玉土をすりつぶしたもの、飽和透水係数 $K_s = 4.1 \times 10^{-4}$ cm/sec)を詰めた。マトリクス下端面はガーゼを介して大気圧解放とした。散水は散水装置により任意の強度で行えるが、今回は岐阜県山岡町兼平試験流域にて観測された降雨波形を参考に、強度13.5mm/hrで20分間散水の後に87mm/hrで20分間(計33.3mm)とした。パイプ及びマトリクス部下端からの累加流量を測定すると共に、マトリクス部深さ5, 15, 25及び45cmにテンシオメータを設置して土壌水の圧力状態を経時的に捉えた。

3. 実験の観察及び考察 散水開始から20分間はパイプ内の流れは観察されなかったが、15分後にはマトリクス部下端から流出が見られた。23分後に表面付近でパイプ流発生したが、地表では湛水しておらず、表面2~3cmの飽和したマトリクス部からパイプ内に流入したものである。流れの先端はマトリクスに水を吸収させながら降下していった(図-3)。この浸潤の過程の概要は、Beven and Germannの述べたモデルに類似している。少なくとも図-2中のアンダーラインのついた部分のパイプで見られたパイプ内流れは、薄く壁面に沿った流れと水滴状の流れによる輸送が主であったが、一部細いパイプ(内径4mmと6mm、図-2中太線枠の部分)とその結合部では空気との縞をなす流れと

なった。30 分後にはそれが下端まで到達し、15 分後から流出していた Pipe5 を除いて、Pipe7, 11, 12, 14 で流出が始まった。図-4 は下端パイプとマトリクス部からの累加流量の分布であるが、40 分後に散水を停止すると、1, 2 分で下端パイプからの流出は極端に低減し、一方でマトリクス部からの流出が2時間後程度まで続いたことがわかる。24 時間後までにすべての流出は停止したが、カラムの水の収支は流入 1665cc に対して流出 1850cc と若干多く、流出量の内訳はパイプからの合計が流出の 53.2% と約半分を占めている。但し、マトリクスが2時間ほどかけて流出するのにに対して、パイプからは強い散水強度の時間内に殆どが流出しており、これらの時間特性には大きな違いがある。また、今回の強度においてはパイプ内流れの発生から下端流達まで約7分と短く、連続粗空隙を持つ土壤に置き換えて考えると水分の速やかな鉛直輸送を予想することは容易である。図-5 は、テンシオメータで捉えたマトリクス部の水圧の経時変化である

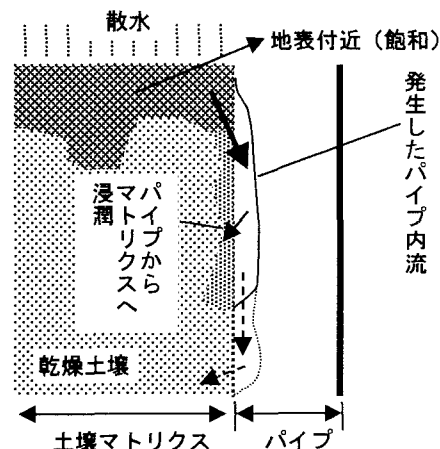


図-3 パイプ内流れの発生と流下の過程の概要（断面図）

が、散水直後から何れの点でも圧力上昇が始まっており、20 分後には上から3点ともほぼ同じ圧力となり、水分状態の一樣化がすでに進んでいることがわかる。強度が上がる20 分後からは浅い方から順に急激な上昇を見せており、その時刻はパイプ下端からの流出とほぼ一致するが、それがパイプからの水分供給なのかは判断できない。パイプネットワークと径の分布による影響については、薄い壁面に沿った流れを持つところと流れのないところとを目で区別するのが難しく、ネットワーク全体での流れの配分を詳しく把握するに至っていないが、表層付近のパイプ内でまとまった流れ（厚みのある壁面に沿った流れや、縞状の流れ）が一旦形成されて、それが結合部で下方の一方にのみ流れる、又はまとまった流れ同士が結合部で一つの流れになる、というように分散しないで流下するプロセスが維持されて到達した下端パイプから多くの流量が測定されている。パイプ結合部での径の配置と流れの集中化及び拡散との関係を説明する事は今後の課題である。

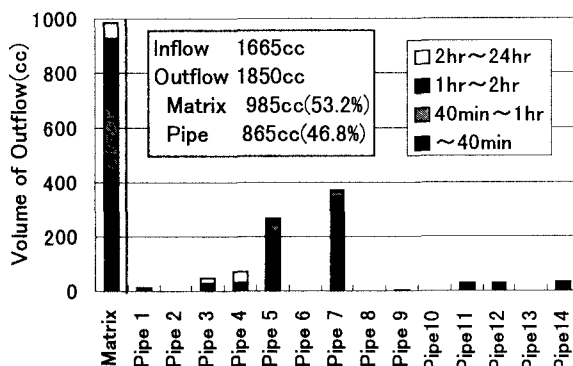


図-4 下端からの流出量の分布

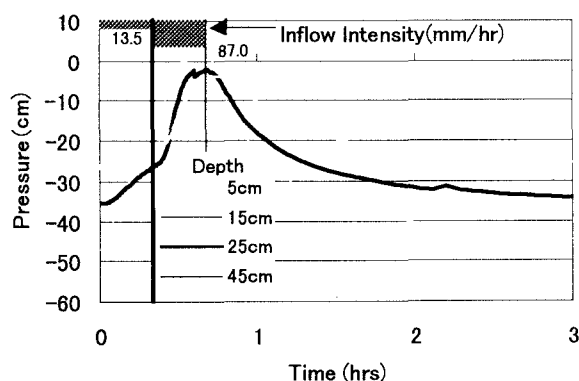


図-5 土壤水の水圧分布

4. おわりに 今回の実験では、連続した粗空隙ネットワークの水鉛直輸送プロセスにおける鉛直下方の速い輸送の形態と、水平方向の集水性を見て取ることができた。今後は、パイプ内流れの発生条件や、パイプ流先端の進行速度や流量の、マトリクス土壌の透水性やネットワークの形態との関わりについて検討し、速い中間流出への効果を表現することを考えていく。

参考文献 1) Beven and Germann: Water Flow in Soil Macropores II. A Combined Flow Model, Jour. of Soil Science, Vol. 32, pp. 15-29, 1981.