

(82) 岩盤内地下水挙動に与える 表土と降雨パターンの影響の解析

埼玉大学 正会員 渡辺邦夫
埼玉大学 学生会員 ○ 荒井紀之
熊谷組 正会員 村田 均

Numerical analysis of the rain infiltration in fractured rock mass
covered with surface soil layer.

Kunio WATANABE, Saitama University
Noriyuki ARAI, Saitama University
Hitoshi MURATA, KUMAGAI GUMI Co., Ltd.

Abstract

The rain infiltration in a fractured rock mass was numerically analysed. As the rock mass is usually covered with surface soil layer, rain at first infiltrates in the soil layer and then enters into the rock mass. The groundwater behaviors in the soil layer and in the rock mass were calculated by the use of FEM and a fracture net-work model respectively in this analysis. The infiltration of rain from the soil layer into the rock mass was calculated by taking into account the capillary suction forces acting just above and just below the interface between these two media. It was found that this analytical model can be well used to simulate the transient change of the groundwater table in a fractured rock mass in response to the rain.

1. はじめに

降雨に伴った岩盤地下水の間隙水圧や地下水位の変動を調べることは、岩盤中の地下水流れを把握する上で重要であり一般的に調べられている。その結果たとえば岩盤内の地下水面の変動パターンとして、降雨に伴い急激な昇降を繰り返すものや、降雨にはあまり相関性が無く緩慢な変動を示すものなどが報告されている。この変動に影響を及ぼす因子として、岩盤中の割れ目の性質、降雨パターン、表土の性質、斜面形状等が考えられるが、これらの因子を解析に組み込めうような物理的な水理モデルはまだ確立されていない。そのため、一つ一つの因子の影響が必ずしも明かになっていない。したがって測定された水位、水圧変動の意味を解釈する上で難しい点があったと考える。本研究は、このような水理モデル作成の一つの試みであり、特に岩盤浸透に与える降雨パターンと表土の影響を数値計算により検討したものである。

2. 解析モデル

まず本論文で用いる浸透モデルおよび解析手法について簡単に説明する。^{1), 2)} この解析では、図-1に示されるように全体の流れ場を表土、表土・岩盤界面、岩盤の3つに分けて考える。山地斜面表層部は、表土・崩積土・崖錐堆積物等に被服されていることが一般的であり、降雨は一度これら表層土に貯留されてから岩盤中へ浸透する。まず表層土中の地下水の浸透は多孔質媒体内の流れとして取扱い、飽和・不飽和状態の浸透流の解析を有限要素法を用いて行う。つぎに、岩盤中の地下水は、岩盤中で水みちを構成している連

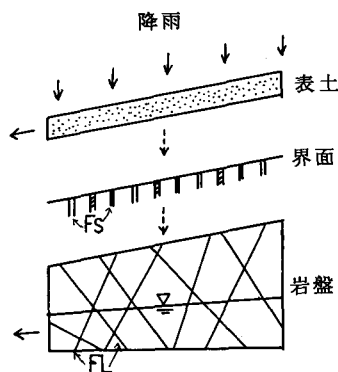


図-1 モデル概念図

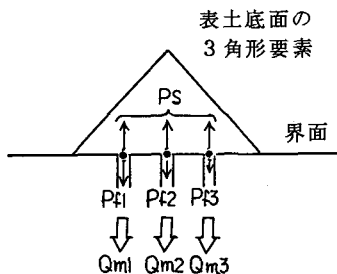


図-2 表土・岩盤界面に作用する毛管力(P_s, P_{fi})と最大流下可能量(Q_{mi})

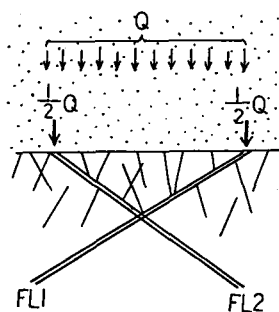


図-3 表土から岩盤中の主要な割れ目への水の受渡しモデル

統性の良い大きな割れ目(FL)を取り出し、それらを浸透経路としていわゆるフラクチャーネットワークモデルで解析する。こういった二つの異なった場を同時に解析する時、二つの場をつなぐ表土・岩盤界面での水のやりとりが問題となる。このやりとりを表現するために渡辺らがすでに報告した界面における毛管力のバランスを考えたモデル³⁾を用いる。ここで、そのモデルを簡単に説明する。岩盤上部は風化作用等により様々な規模の微小割れ目(FS)が発達しており、表土底面の地下水はまずこの微小割れ目(FS)に入り、次に岩盤中の主要な割れ目(FL)に供給されるものとする。図-2は界面付近を取り出したものであり、図中の三角形は表土最下部の有限要素メッシュである。図中の黒丸で示す界面上の水粒子には、表土底面に働く毛管力 P_s と微小割れ目からの毛管力 P_{fi} が作用しており、 $P_{fi} > P_s$ の場合にのみ表土からその割れ目へ地下水が浸透すると考える。今回の解析においては、表土底面の各要素には三種類の微小割れ目(FS)が接続しており、各微小割れ目はそれぞれ一定の毛管力 $P_{fi}(i=1\sim3)$ および、透水性と割れ目本数(割れ目密度)から定まる最大流下可能量 $Q_{mi}(i=1\sim3)$ が定まっているとした。表土底面の毛管力 P_s との比較によって、どの微小割れ目に流入するかが決まるが、その量が各割れ目中を流れうる最大流下可能量を越えた場合には、最大流下可能量が割れ目に流入することとする。このようにして要素ごとに表土から岩盤への浸透量が求められた後、岩盤中の主要な割れ目(FL)への水の供給は、図-3に示されるように割れ目 FL1と割れ目 FL2の間に入る表土からの浸透量 Q を各々の割れ目に半分ずつ与える。このようにモデル化すれば表土・岩盤間の水の受渡しが表現できる。

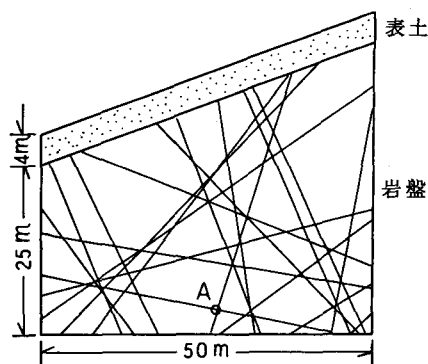


図-4 解析に使用した表土・岩盤モデル

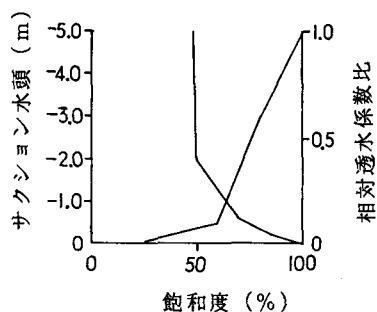


図-5 解析に使用した不飽和浸透特性

図-4は解析に使用した表土・岩盤モデルであり、岩盤中の割れ目系はその方向と透水係数をモンテカルロ法を用いて決定した。初期条件としては岩盤、表土内にそれぞれ10m、約0.5mの初期水位を与え、表土の初期飽和度は約64%とした。境界条件としては、表土上面より一定降雨強度の雨を与え、表土前面下部に自由浸出境界を設定した。一方、岩盤は左側面に10mの一定水位を与え、底面および右側面は不透水条件とした。なお表土内の地下水解析に用いた不飽和特性を図-5に示す。岩盤モデル中のA点は、解析した間隙水圧を表示する代表点である。

3. 解析結果

岩盤浸透に与える降雨パターンと表土の影響を調べるために表-1に示されるような4つのケースについて解析を行った。ケースAは、降雨強度20mm/hourの降雨が10時間、表中に示される透水性を持つ表土・岩盤系に与えられる場合である。ケースB～Dは、それぞれケースAの一つの条件を変化させたものであり、ケースBは降雨強度の小さな雨が長時間降る場合、ケースCは微小割れ目の最大流下可

表-1 解析条件

ケース	A	B	C	D
降雨強度(mm/hour)	20	5	20	20
降雨継続時間(hour)	10	40	10	10
表土透水係数(cm/sec)	均質 1.0×10^{-3}	均質 1.0×10^{-3}	均質 1.0×10^{-3}	2層 1.0×10^{-3} 1.0×10^{-4}
最大流下可能量 (m^3/sec)	5.0×10^{-8} 5.0×10^{-7} 5.0×10^{-6}	5.0×10^{-8} 5.0×10^{-7} 5.0×10^{-6}	1.0×10^{-8} 1.0×10^{-7} 1.0×10^{-6}	5.0×10^{-8} 5.0×10^{-7} 5.0×10^{-6}

能量をケースAの5分の1にした場合、ケースDは表土下部に0.4mの厚さの低透水層を持つ場合であり、表中の2つの透水係数は、それぞれの層の設定値である。ケースC、Dは岩盤中へ降雨が浸透しにくい条件を設定したといえる。

図-6は、岩盤地下水の間隙水圧変化を時間に対してプロットしたもので、図-4中の点Aにおける値である。ケースAでは、降雨に伴い急激な間隙水圧の上昇と下降がみられ、降雨停止後4時間後に約17mの水頭上昇が生じている。それに対しケースB、C、Dにおいては、間隙水圧の変動量はケースAに比べ小さく6～7mである。また、そのピーク値時間はケースBにおいては降雨停止時、ケースC、Dでは降雨停止約20時間後である。したがって降雨強度が小さい場合、あるいは表土下部に低透水層がある場合、および表土・岩盤界面における微小割れ目の最大流下可能量が小さい場合には、岩盤地下水の間隙水圧変化が抑えられることがわかる。また、岩盤間隙水圧のピーク値が降雨強度や表土の状態によってかなり変化することがわかる。

図-7は、岩盤中への浸透量（以下岩盤浸透量と書く）、斜面先浸出量の経時変化を片対数グラフにプロットしたものである。岩盤浸透量について各々のケースを比較してみると、ケースAでは変動量が大きく降雨停止5時間後に約 $160cm^3/sec$ のピーク値を示し、その後急速に低減する。これに対し、ケースB、C、Dにおいては変動量はケースAに比べ比較的小さく、ケースBでは降雨停止20時間後に約 $65cm^3/sec$ のピーク値を示し、その後緩やかに低減する。ケースCとDでは、降雨停止20時間後に約 $50cm^3/sec$ のピーク値を示す。斜面先浸出量について比較してみると4つのケースにおいて際違った差異は認められないが、ケースAでは降雨停止6時間後に約 $1.45cm^3/sec$ の微弱なピーク値を示し、ケースCとDでは降雨停止20時間後に約 $2.0cm^3/sec$ のピーク値を示す。このように最大流下可能量が小さいケースCや表土底面に低透水層があるケースDにおいては斜面先浸出量がやや大きくなり、岩盤への浸透がおさえられることがわかる。

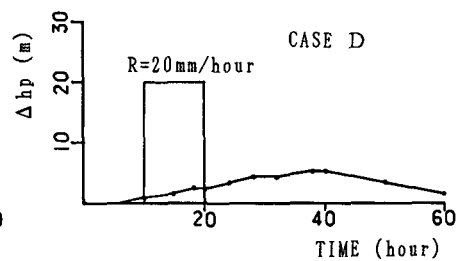
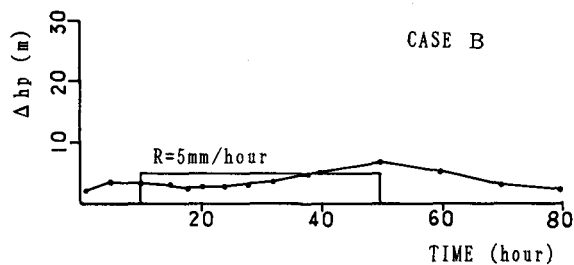
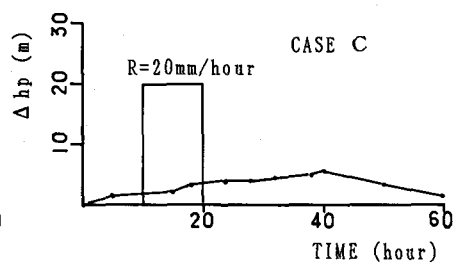
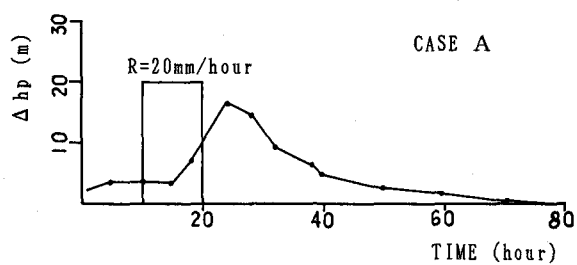


図-6 A点における圧力水頭の時間変動

Δh_p : 圧力水頭変化 (m)
R : 降雨強度 (mm/hour)

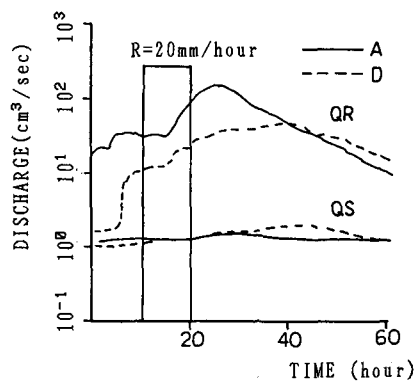
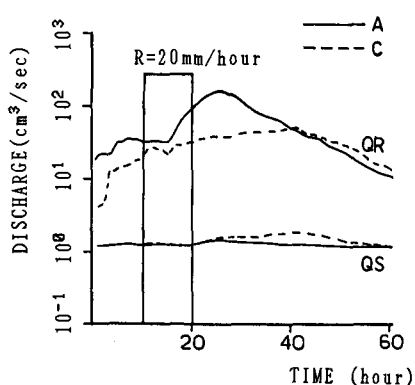
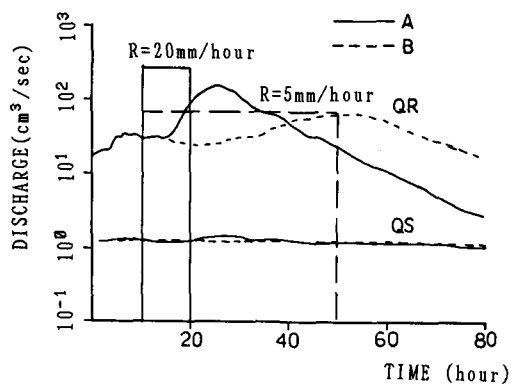


図-7 岩盤浸透量、斜面先浸出量の時間変化

QR : 岩盤浸透量 (cm³/sec)
QS : 斜面先浸出量 (cm³/hour)
R : 降雨強度 (mm/hour)

降雨に伴う岩盤中の間隙水圧変動は、当然岩盤中に浸透する降雨量により大きく影響を受ける。以上の結果は、その岩盤浸透量が、表土特性や降雨パターンにより複雑に変化し、簡単に評価しにくいものであることを示している。このことは表土が降雨を一時貯留することによって、深部岩盤への浸透を制御する効果を持っていることによるものである。したがって、降雨に伴う岩盤内間隙水圧変化の解析には降雨パターンや表土の影響を十分に評価しておかなければならないといえる。

今回の均質多孔体モデルとフラクチャーネットワークモデルを組み合わせた解析によって、降雨に伴った間隙水圧変動が解析しうることが明かになった。岩盤内間隙水圧変化に与える表土層の影響を解析・評価しえることは本モデルの大きな特徴である。しかし、モデル中に含まれるパラメータの性質についてはまだ研究が必要である。今後は実岩盤の測定を通じて、モデルの改良をあわせ、さらに検討していきたい。

<<参考文献>>

- 1) 村田 均, 渡辺邦夫, 表土の不均質性と下部岩盤への浸透を考慮した斜面安定解析,
第24回土質工学研究発表会, 1989.
- 2) 渡辺邦夫, 荒井紀之, 表土の不均質性と岩盤への浸透を考慮した降雨浸透流出解析の試み,
土木学会第44回年次学術講演会, 3, pp. 538-539, 1989.
- 3) 渡辺邦夫, 玉井信行, 表土におおわれた岩盤斜面内への降雨浸透機構,
第26回水理講演会論文集, pp. 313-320, 1982.