

double porosity modelを導入した岩盤浸透流の研究

The concepts of double porosity model and its applications to problems on seepage flow in fractured rock

埼玉大学 工学部 正会員 ○渡辺邦夫

" " " 佐藤邦明

序 言

周知のようにダム・トンネルなど岩盤中に作られる構造物周辺の浸透問題を考える場合、それら構造物のスケールから、数100m～数kmオーダーの広がりを持つ大きな岩盤の流れの場とする浸透流の性質を把握する必要がある。しかし我が国においては、通常その程度の大きさの岩盤は異った透水性を持つ数種の岩石によって構成され、さらに内部に種々の大きさのcrack系（本文では裂力、節理、断層等を総称してcrackとする）が発達しており、それが複雑な透水経路網を形成しているため、浸透流の性質がとらえにくい。そのため、従来、このような構造物周辺の浸透流の性質は構成岩種ごとに、あるいは数m～数10mの破碎帯がある場合にはその部分のみ代表的な透水係数や貯留係数などの水理定数を変えて、数値計算する方向で主に応用がなされてきた。¹⁾ これは、大きな水理地質構造がまず全体の浸透流の性質を規定することを仮定するもので、考え方そのものは妥当であろう。しかし、同一種岩石や破碎帯部分をみるとその中にも種々の大きさのcrack系が多数含まれていることが一般的で、砂、粘土層のように均一透水層とは必ずしもいえない。たとえば、トンネルなどの湧水状態をみても、大きな破碎帯を除けば湧水が顕著であるのは、幅数mm程度の開口したcrackや幅数cm～数10cm程度の破碎帯が中心で、それより小さなcrackからはほとんど湧水していない。したがって、たとえ同一種岩石で構成され、幅数m～数10m程度の破碎帯がない所であっても透水性を一組の水理定数で表現しうるか疑問である。この場合は、やはり透水性の良いcrack系とそうでないcrack系を分けて考えることがより妥当であろう。しかし、砂や粘土層など粒状多孔体より成る均一透水層浸透流を解析する従来の方法では、このようなcrack系の差異を考慮することは困難である。そのため、今回岩盤浸透流の性質把握にあたって、従来均一透水層と考えられてきた部分をdouble porosity modelでおきかえ、検討した。このモデルは、まだ一般的でなく本論文ではまずdouble porosity modelの考え方、妥当性を、岩盤crack系の透水性と併せ考察する。その後、二・三の実験的な問題例について数値計算を行い、特徴を論ずる。

1 double porosity model と地下水流動基礎式

double porosity modelは、1960年にBarenblattら²⁾が提唱したもので、その後石油資源工学の分野で応用例が二・三³⁾あるが、土木工学上の問題に適用した例はほとんどない。この考え方を模式的に示せば、図-1のようである。まず全体の透水体中には、間隙Ⅰで示されるcrack系が透水経路網を作っている。一方、このcrack系で囲まれた部分の中には、より小さな間隙Ⅱが存在する。各々の間隙系は、全体の透水体に対して透水係数 k_1 , k_2 , 間隙率 λ_1 , λ_2 を有している。double porosity modelは、このように一つの媒体中に透水性の異なる二種類の間隙系を考えるものである。Barenblattらは、やや固結した砂岩のようなporosityの高い岩盤にcrack系が発達した場合を仮定し、 k_1 , k_2 , λ_1 , λ_2 の関係として、 $k_1 \gg k_2$, $\lambda_1 < \lambda_2$ としている。したがって、地下水の流動は透水係数の大きい間隙Ⅰを主経路とし、一方間隙Ⅱは、間隙率が大きく透水係数が小さいため、貯留効果を主にもつことになる。もし、 $k_1 \gg k_2$, $\lambda_1 < \lambda_2$ の関係が成立すれば、このことから間隙Ⅰを流動系間隙、間隙Ⅱを貯留系間隙とよぶことができる。以下、この条件において、これらの言葉を用いる。

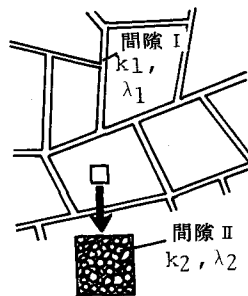


図-1 double porosity modelの模式図

つぎに、double porosity model内の地下水流動の基礎式であるが、通常

の均一様透水層中の基礎式誘導と同じく、二次元の場合図-3のような単位セル中の水収支を考える。ただし、ここで以下の仮定を設定する。①単位セル中には間隙Ⅰ、Ⅱを含み、したがって、間隙Ⅰ中の平均間隙水圧を p_1 、間隙Ⅱ中の間隙水圧を p_2 とする。定常状態の場合は $p_1 = p_2$ である。②単位セルへの水の出入りは、間隙Ⅰのみを通して行う。③間隙Ⅰは、考えている流場ではすべて連続している。このうち②の仮定は、前述の例のように $k_1 \gg k_2$ であれば十分成立する。このような仮定を導入し、間隙Ⅰ、Ⅱについての全体的な圧縮率を c_1, c_2 、間隙Ⅰの x 方向流速を u 、 y 方向流速を v とおけば、連続式として非定常の場合、間隙水圧 p_1, p_2 の代りにピエゾ水頭 h_1, h_2 を用い

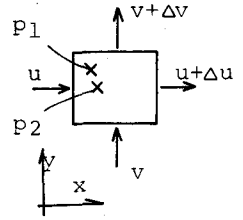


図-2 単位セル中の水収支

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = c_1 \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} + c_2 \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} \quad (1)$$

と書ける。 c_1, c_2 の値としてWarrenら³⁾は、間隙Ⅱがすべて連続している場合、水の圧縮率 β 、間隙Ⅱを含む部分の圧縮率を α として、近似的に

$$c_1 \approx \beta, \quad c_2 \approx \beta + \alpha \quad (2)$$

を与えた。また u, v については、透水異方性を考え、 x, y 方向が透水テンソルの主方向と一致すれば、

$$u = k_{x1} \frac{\partial h_1}{\partial x}, \quad v = k_{y1} \frac{\partial h_1}{\partial y} \quad (3)$$

と書ける。ここに k_{x1}, k_{y1} は、それぞれ間隙Ⅱの x, y 方向の透水係数である。(3)式を(1)式に代入して、

$$k_{x1} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + k_{y1} \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} = c_1 \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} + c_2 \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} \quad (4)$$

を得る。ここで、 $\lambda_2 = 0$ 、であれば(4)式は均一透水層の地下水流動基礎式と一致する。また h_1 と h_2 の関係については、間隙ⅠとⅡの間の水の移動が単位セル中のそれぞれの水頭差($h_1 - h_2$)に比例するととして、

$$\lambda_2 c_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} \approx \gamma \cdot k_2 (h_2 - h_1) \quad (5)$$

と近似的にあらわす。ここに k_2 は間隙Ⅱに関する透水係数で等方性を仮定している。また γ は L^{-2} の次元を持つ定数で、間隙Ⅱを持つ部分の形状に関するパラメーターである。以上から、double porosity modelにおいては、地下水流動は(4)、(5)式を連立させてあらわすことになる。

2 岩盤 crack 系にみられる double porosity 性

ここで岩盤浸透流は一般に double porosity 性を持っていることを論ずる。対象とする間隙としては序言で述べたように、幅数10 cm 以下の破碎帯や、数 mm 以下程度の開口 crack 等である。まずこのような大きさの間隙の中で、透水経路となりうる最小なものは、堆積岩であれば粒子と粒子との間に形成された微小な空隙があげられる。通常この空隙は長い地質時代を通して堆積期間に続成作用をうけセメント物質などによって埋められてゆくが、新第三紀程度の岩石ではまだかなり多くの空隙が残ри、間隙率30%程度を示すものも珍しくはない。また火山岩であれば、岩石固結時の微小な気包などが考えられる。以上は、岩石の生成時に形成された微小空隙である。さらに、岩石は、受けた応力状態によって、ヘキ開、や結晶粒間の開口などの微小な crack 系を持つことになる。ここで、この程度の大きさの微小空隙を、生成条件によらず、スケールⅡの間隙と総称する。このスケールⅡの間隙は岩石中に無数に存在し、種々の岩石に特有の透水性を与えている。このスケールの間隙による岩石の透水性はたとえばボーリン

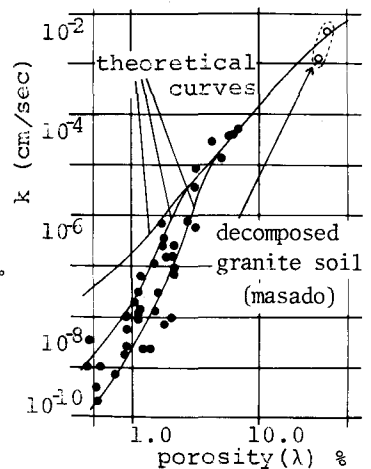


図-3 花崗岩コアサンプルの透水係数(k)と間隙率(λ)との関係

グコアサンプルを用いた室内透水試験により調べることができる。この室内透水試験による岩石の透水係数については、従来からも多くの研究がなされているが、筆者らは微少な crack 系の発達した花崗岩コアサンプル（径約 5 cm，長さ 10 cm）について調べ、間隙率（ λ ）と透水係数（ k ）の間に図-3のような関係があることを報告した。⁴⁾ また同様な関係については、石油工学の分野でも、石油母岩層に関してよく調べられている。いづれにせよたとえば図-3の関係から、花崗岩について間隙率 5% 程度であれば 10^{-5} cm/sec 程度の透水係数を持つことが示される。このような性質は他の岩石にも同様にみられる。

つぎに、これらの微小間隙より大きなスケールの間隙を考えると、たとえば火成岩にみられる岩石冷却時の節理、幅数 cm ～ 数 10 cm 程度の破碎帯などがあげられる。節理は幅数 mm 程度の開口した crack として存在することが多い。また石灰岩のような水溶性の岩石にあっては、溶脱した間隙も形成される。この程度の間隙も普遍的に観察され、いま、総称してスケール I の間隙とする。スケール I，II の分け方は、厳密に定義されるものではなく、相対的に大きい、小さいを意味する便宜的なものである。ここで、スケール I の間隙系の透水性を考えるが、まずモデル的に図-4に示す一辺 L m の岩盤を考え、 $\vec{j}$ 方向に透水するものと仮定する。もし、この岩盤中にスケール II の微小な間隙のみ発達しているとするならば、たとえば花崗岩であれば図-3のような透水係数を示すはずで、それを k_2 とする。

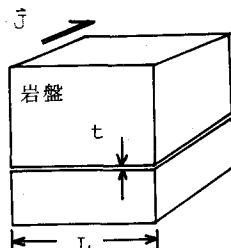


図-4 スケールの異なる間隙系による透水性

つぎに、この岩盤中に間隙幅 t cm のスケール I の間隙が $\vec{j}$ に平行方向に入っていると考える。いま、簡単のためそれが開口した crack であったとし、その透水係数が平行平板間のポアズイユ流れで近似できれば、岩盤全体の透水係数 k は、

$$k = k_2 + k_1, \quad k_1 = \frac{g t^3}{12 \eta L} \times 10^{-2} \quad (\text{cm/sec}) \quad (6)$$

で表現できる。ここに、 g は重力加速度、 η は動粘性係数である。また、この crack が占める間隙率は t/L となる。例として、花崗岩を考え、 $L = 1$ m， $k_2 = 10^{-5}$ cm/sec， $t = 0.1$ cm，スケール II の間隙率（ λ_1 ）5% とすれば、(6) 式の k_1 は、約 8.2×10^{-2} cm/sec となり、 k_2 に比べて数オーダー大きな値となる。一方、スケール I の占める間隙率（ λ_2 ）は 0.1% にすぎない。従って、 $k_1 \gg k_2$ ， $\lambda_1 \ll \lambda_2$ となり、このようなモデルについては、double porosity 性を強くもつことになる。以上、仮定したモデルの条件が実際の岩盤中に存在するかどうかは問題であろう。しかし、スケール I の crack の透水係数がポアズイユ流れで記述しうるかどうかは別としても、トンネルや調査横坑内では、この程度の crack から大量の湧水がみられ、考え方そのものは妥当であろう。また、こういった考え方の一つの検証として、ボーリング孔を用いたルジオン試験結果と、そのボーリングコアサンプルの透水試験結果を比較することも可能である。ルジオン試験は、通常ボーリング長 5 m あたりの平均透水係数を測定するから、その値はスケール I，II の両方の間隙の影響をうけるが、コアサンプルの透水試験ではスケール II の間隙のみの透水性が把握しうる。实例として、古生層及び熱水変質された中生代貫入岩の分布する地域で比較したところ、ルジオン試験で $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/sec 付近のコアサンプルが、 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ cm/sec を示した。さらに、この地域の岩石について、図-5のような相対的に大きな crack を有するコアサンプルを実験室内で注意深く取り出し、このような crack を含まない部分の透水係数と比較した。その結果、前者については、間隙率 11.36%，透水係数 1.2×10^{-6} cm/sec であったのに対し、後者は、間隙率 1.096%，透水係数 4.4×10^{-7} cm/sec となった。したがって、スケール II の crack は、間隙率 0.4% しか持たないが、約 3 倍透水係数を増加させたことになる。この場合も、 $k_1 > k_2$ ， $\lambda_1 < \lambda_2$ の条件が成立する。さらに、種々の岩についても、こういった傾向が一般的にみられている。したがって、岩盤浸透流の流れの場のモデルとして、double porosity model を採用することは妥当性が高いといえる。また、これから、スケール I の間隙を流動系間隙、スケール II を貯留系間隙としうる。つぎに、岩盤に

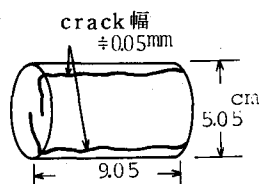


図-5 コアサンプル中にみられたスケール I の crack 例

double porosity modelを仮定し、それを従来のような、岩盤に代表的な透水係数、間隙率を与える考え方の問題点を検討する。ここで実際の岩盤が $k_1 \gg k_2$, $\lambda_1 < \lambda_2$ とすれば、ルジオン試験等の現場透水試験で得られる透水係数は、流動系間隙による透水係数 k_1 に近いはずである。一方、間隙率は $\lambda_1 + \lambda_2$ であるから、むしろ貯留系間隙の間隙率に近いことになる。したがって、従来の考え方によれば、透水係数、間隙率としてすべて大きい方の値を採用し実際の現象がうまく表現しえない恐れが十分あろう。

岩盤が double porosity 性を持つことを検討した以上の議論の問題点は、スケール I, II の間隙も、すべて連続しているとした点であろう。間隙の連続性が、とくにスケール I の間隙について検証しえねば、このモデルを一般の大きな流れの場を持つ問題に適用しえない。この連続性については、筆者らが確率過程の考えを導入して検討しているが、⁵⁾ 三次元的な連続を考えねばならないため、検証が難しい。しかし、火成岩中の冷却に伴う節理などはほぼ連続していると思われるし、また、トンネルなどで行なわれるトレーサーを流して連続性を調べる試験結果からみると、スケール I の間隙がすべて連続していないにしても、ある程度は連続していると考えてよからう。また、スケール II の間隙については、筆者らが染色浸透検傷試験で報告しているように、⁶⁾ 花崗岩中の micro-crack などの場合はかなり良いと思われる。したがって、まだ問題は残されているものの、スケール I, II の間隙共ある程度の連続性は仮定しえよう。

3 double porosity model による応用とその性質

ここで、double porosity modelを導入して、実際的な問題についてモデル的に計算を行い、従来の代表的な一組の透水係数、間隙率を仮定する考え方との比較をして、その性質を検討する。前述したように、double porosity model は、とくに非定常変化を記述するものであるから、問題例としては、非定常性の強い現象を選ぶことになる。今回は、海底空洞周辺の水頭分布と湧水量の非定常変化、および岩盤斜面の降雨-地下水位の応答性を調べる。

3-1 海底空洞の水頭分布と湧水量の非定常変化

計算は前述の基礎式(4)、(5)を差分化し、図-6に示す条件で行う。図中、H=透水性岩盤厚さ、Ha=土被り、Th=空洞高さ、Tb=空洞幅、Hd=空洞下底面から不透水性岩盤までの深さ、Hs=水深、AA'線は空洞中心線である。空洞は長方形断面としている。今回の計算は座標を図のようにとり、H=96m、Ha=54m、Th=10m、Tb=24m、Hd=32m、Hs=24m、およびx方向の境界までの距離L=240m、この境界での水頭値一定に設定した。また計算メッシュは、△X=4m、△Y=2mの長方形とした。透水性岩盤の中で、スケールIの流動系間隙については透水異方性を持ち、透水テンソルの主方向はそれぞれx、y方向(水平・鉛直方向)に等しく、値は k_{x1} , k_{y1} とした。一方スケールIIの貯留系間隙は、 k_2 で、異方性を仮定していない。計算は、流動系間隙、貯留系間隙の間隙率 λ_1 , λ_2 , 圧縮率 c_1 , c_2 , 透水係数 k_{x1} , k_{y1} , k_2 , 形状パラメーター γ として表-2の値を用い、5ケース行った。圧縮率、間隙率の大きさは、岩盤が大谷石程度の新第三紀堆積岩でできていると想定して定めた。表中Run1, 2, 3は double

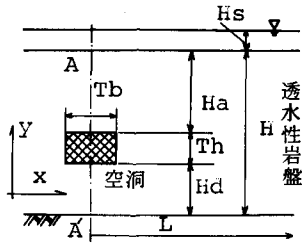


図-6 海底空洞モデル

表-1 計算条件

Run	k_{x1} cm _s	k_{y1} cm _s	k_2 cm _s	λ_1 %	λ_2 %	c_1 $\times 10^5$ (%/cm)	c_2 $\times 10^5$ (%/cm)	γ cm ²
-1	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-6}	1.0	20.0	1.0	100.	0.001
-2	〃	〃	1×10^{-7}	〃	〃	〃	〃	〃
-3	〃	〃	1×10^{-6}	〃	〃	〃	1.0	〃
-4	〃	〃	-	21.0	-	100.	-	-
-5	〃	〃	-	〃	-	1.0	-	-

porosity 性を仮定したものであり、Run 4, 5は比較のため検討した従来の考え方によるものであるが、この場合間隙率(λ)としては、double porosity modelの $\lambda_1 + \lambda_2$ にとった。圧縮率はこの場合貯留係数(s)と類似し、Run4, Run5で1オーダー変えてみた。結果について、まず図-7は湧水量の非定常変

化をみたものである。Run 2はRun 1に比べて貯留系間隙の圧縮率 C_2 を1オーダー小さくしたもので湧水量は全体に小さくでている。Run 3は貯留系間隙の透水係数を1オーダー小さくして、貯留系間隙と流動系間隙との水のやりとりを少なくしたもので、初期の湧水量が小さくでている。Run 1, 3と従来の考え方によるRun 4と比較すると、double porosity modelの場合、非定常性の強い時間 $T < 0.025$ dayまでは、Run 4と相違しており、この傾向はRun 3で顕著である。

これは貯留系間隙の効果をあらわしている。一方 $T > 0.025$ ではほぼ一致しているといえる。これから、double porosity 性の影響は海底トンネルの湧水の場合、初期で大きく、その大きさは貯留系間隙の透水係数で決定されるということができよう。つぎに、図-8はRun 2, 4について、 $T = 0.01, 0.09$ day後の、空洞中心線AA'上の水頭分布をみたものである。

Run 2については流動系間隙、貯留系間隙がそれぞれ水頭値 h_1, h_2 を持つ。図から、まず流動系間隙の h_1 が低下し、貯留系間隙の h_2 は $T = 0.01$ 程度までは高い値を持っていることがわかる。この傾向をRun 4と比較すると、Run 4では、空洞近傍でRun 2の h_1 に近い値を持ち、空洞から離れるにつれ、 h_2 に近づき、さらには h_2 より高くなる性質がみられる。したがって水頭分布に関して、従来のモデルによる水頭は必ずしもdouble porosity modelの h_1, h_2 の平均値ではないことがわかる。これは1つの興味ある性質であろう。

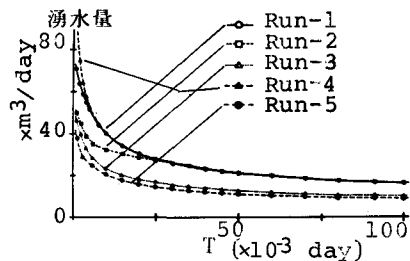


図-7 湧水量の非定常変化

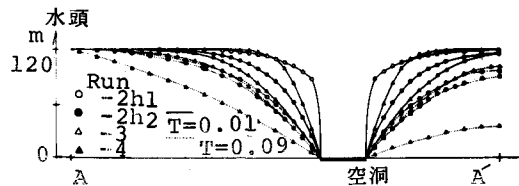


図-8 空洞中心線上の水頭変化

3-2 岩盤斜面における降雨-地下水位応答関係

岩盤斜面での降雨-地下水位応答関係については、沖村・田中ら⁷⁾の実測に基いた研究があり、それによれば、岩盤斜面では降雨-地下水位の応答性はやく、地下水位上昇量もかなり大きいなどの特徴的な性質が報告されている。ここで、double porosity modelを用いて、岩盤斜面での降雨-地下水位の応答関係を調べてみる。流れの場合は図-9で示されるものとし、 L は斜面長さ、 H_t は透水性岩盤厚さ、 Q は降雨涵養量である。基礎式は(4)、(5)となるが、今回平面一次元の不被圧流れとして計算する。

その場合基礎式は、鉛直流速の効果を無視して、

$$T_{X1} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + Q = \lambda_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} + \lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} \quad (7)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = r \cdot T_2 (h_1 - h_2) \quad (8)$$

となる。ここに T_{X1}, T_2 はそれぞれ流動系間隙、貯留系間隙に関する透水量係数であり、

$$T_{X1} = k_{X1} \cdot h_1, \quad T_2 = k_2 \cdot h_2 \quad (9)$$

である。計算は、図-9において、 $L = 50m$ 、 $H_t = 60m$ 、水位差 $\Delta H = 10m$ 、透水性岩盤下底面勾配 $\Delta G/L = 0.2$ に設定し、初期条件としては、涵養がない場合の定常状態水位を与えた。涵養量は、まず時間あたり $3.6mm$ を50分間与え、水位変化をみた。またこの涵養量は、すべて流動系間隙に流入するものと仮定した。岩盤の $k_{X1}, k_2, \lambda_1, \lambda_2, r$ 等は表-2のように与え、Run-1~Run 3までの3ケースについて(7)、(8)式を陰解法差分で計算した。ここでRun 1, 2がdouble porosity modelによるもので、Run

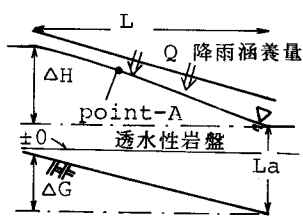


図-9 岩盤斜面モデル

表-2 計算条件

Run	k_{X1} cm/s	k_2 cm/s	λ_1 %	λ_2 %	r cm ²
-1	1×10^{-3}	1×10^{-5}	1.0	20.0	0.001
-2	〃	1×10^{-6}	〃	〃	〃
-3	〃	-	21.0	-	-

3は比較のため、間隙率 λ を、double porosity modelの λ_1, λ_2 を加えたものとして従来の考え方に基いて計算したものである。Run 1, 2については、流動系間隙水位 h_1 と貯留系間隙水位 h_2 の2つを示した。Run2はRun1に比べて貯留系間隙の透水係数を1オーダー小さくしたものである。Run1とRun2の比較を行うとまず h_1 については、両方共涵養に対して、地下水位が上昇し、涵養の終了と共に低下する傾向があり、涵

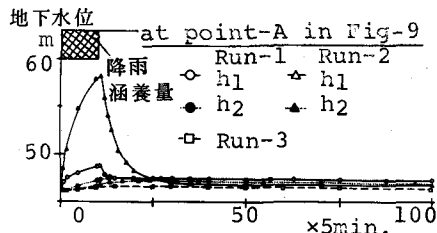


図-10 地下水位変動

養に対する応答性が良い。両者の地下水位上昇量はRun2の方がかなり高いがこれは、Run1では貯留系間隙の透水係数 k_2 がRun2より大きいから、 h_1 と h_2 の水頭差で地下水が貯留系間隙に流入しやすいからである。したがって、逆に h_2 の値はRun1の方が高くなる。 h_2 は、貯留系間隙の間隙率が大きいから、上昇量も h_1 に比べて小さいが涵養終了後もなかなか低下しない。一方、Run3では、涵養に対してほとんど水位が上らず、応答性は明瞭でない。ここでもし、岩盤斜面がRun1, Run2のような条件であり、地下水位として、流動系間隙の h_1 を測定しているとすれば、降雨涵養に対する応答性は、Run3に代表される粒状多孔体のような透水層で期待されるものより、速く、しかも上昇量も大きくなる。また、降雨涵養に対して h_2 は徐々に上昇し、涵養終了後の低下もゆるやかであるから、この性質によって先行降雨の影響を考えることができる。図-11はRun1の条件で涵養を行い、100分後に再び50分間同量の涵養を行った場合である。この図から2回目の涵養時に h_2 水位が高いままで保持されているため、 h_1 の上昇量も大きくなる。以上のような降雨涵養における地下水位応答性の速さ、上昇量の大きさは、double porosity 性を持つ岩盤斜面の特徴と考えられる。

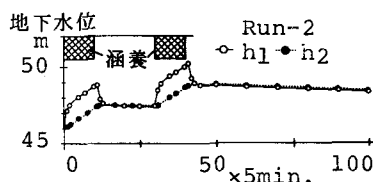


図-11 先行降雨の影響

図-11はRun1の条件で涵養を行い、100分後に再び50分間同量の涵養を行った場合である。この図から2回目の涵養時に h_2 水位が高いままで保持されているため、 h_1 の上昇量も大きくなる。以上のような降雨涵養における地下水位応答性の速さ、上昇量の大きさは、double porosity 性を持つ岩盤斜面の特徴と考えられる。

結 論

以上、岩盤のdouble porosity 性を検討し、岩盤浸透流を考える上でこの性質を導入することがより妥当であることを論じた。さらに、海底空洞での水頭分布・湧水量の非定常変化、岩盤斜面での降雨—地下水位応答性といった具体的な問題にdouble porosity modelによる計算を行って、その性質を調べた。その結果、海底空洞では、湧水量や水頭分布に、特に非定常性の強い時点でかなりの差異がみられた。また岩盤斜面の降雨—地下水位の応答性の検討から、通常の砂、粘土等の地盤に比べ、応答性がよく水位上昇量も大きいという興味ある結果を得、先行降雨の影響も考慮することができた。しかし、岩盤のdouble porosity 性を考える上で、まだcrackの連続性の検討など残された問題もあり、今後さらに研究してゆきたい。

最後に本研究を進めるにあたり、御教示いただいた東京大学高橋裕教授、親切な御討論をいただいた東京大学玉井信行助教授に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) たとえば、佐藤邦明、渡辺邦夫、小田部淳、断層のトンネル湧水に与える影響、埼玉大学地盤水理年報, vol. 4 (1978)
- 2) Barenblatt, G., etc. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Prikl. Matem. Mekh, vol. 24, p.852-864. (1960)
- 3) Warren, J., etc. The behavior of naturally fractured reservoirs, Trans. AIME., no. 228, p. 245-255, (1963)
- 4) 渡辺邦夫、佐藤邦明、花崗岩コアサンプルを対象とした岩盤透水係数の理論的評価、34回土木学会年講, (1979)
- 5) 渡辺邦夫、佐藤邦明、岩盤浸透流の基礎的性質、土木学会水理講演会論文集, 22, p. 297-302, (1978)
- 6) 渡辺邦夫、花崗岩中に発達するmicro-crack系の性状とその定量評価の2, 3の試み、応用地質, vol. 20, p. 12-22, (1979)
- 7) 沖村孝、田中茂、山地孔内水位のシミュレーション解析、34回土木学会年講, (1979)