

透水係数の動的変化を考慮した岩盤浸透流の解析

Analysis of Seepage Flow through Fractured Rock
Considering Dynamic Change of Permeability

埼玉大学大学院 ○学生員 飯沢 雅人

埼玉大学工学部 正会員 佐藤 邦明

はじめに

近年、地下発電所や地下備蓄用タンク、トンネル等の地下構造物の建設にともなう工学的諸問題に係って岩盤浸透流に関する研究が活発になってきている。通常、岩盤中を流れる地下水は、その内部に複雑に発達した割れ目系を主な流路とするため、流れの状態を正しく捉えようとすれば、岩盤の透水性が割れ目系の性質によって、どのように支配されるかを明らかにする必要がある。従来からよくなされているように、割れ目を平行平板モデルで表現すると、岩盤の透水係数は割れ目幅の3乗に比例するので、間隙水圧の変化にともなう割れ目幅の変化は岩盤の透水係数に大きな変化をもたらすはずである。これに関し、Witherspoon⁽¹⁾や小島⁽²⁾は、人工割れ目を設けた岩石の供試体を用いた室内実験の結果から、また、Pratt⁽³⁾は露頭に現れた自然の割れ目に、フラットジャッキにより荷重を加えて行なった屋外実験の結果から、割れ目の幅が、それに垂直に加わる有効応力の変化にともなって変位し、そのために岩盤の透水係数が変化することを報告している。したがって有効応力の変化が生じるような浸透流解析では、それにともなう透水係数の変化を考慮した解析が必要であると考えられる。ところで、有効応力を変化させる要因としては、地盤の全応力の変化と間隙水圧の変化があるので、本研究では、この両者の変化にともなう透水係数の変化を考慮するモデルとして、Snow⁽⁴⁾によって提案されたものを修正し発展させる。そうして得られたモデルから、深度にともなう透水係数の変化を求め、それをルジオン試験から求めた既存の深度と透水係数の分布のデータと比較し、その妥当性を検討する。さらに、本モデルを考慮した浸透流の基本式を求め、それを水底空洞の水理解析に適用し、有効応力の変化が、岩盤内の透水係数の分布、及び、空洞への湧水量に及ぼす影響について論じることとした。

1 Rock Block Model と岩盤浸透流の基本式

1-1 Rock Block Model

岩盤浸透流を扱う場合、図-1に示すように、岩盤中の割れ目を平行平板モデルによってモデル化して考えることが多い。この場合割れ目を流れる水はポアズイユの法則にしたがうとして、割れ目自身の透水係数 k_f は次式で与えられる。

$$k_f = \frac{1}{3} \cdot \frac{g}{\nu} \cdot d^2 \quad (1)$$

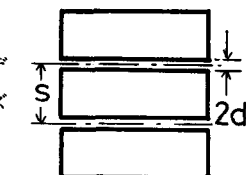


図-1 平行平板モデル

ここに、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数、 d : 割れ目幅の $1/2$ 、である。そして、その割れ目を含む岩盤の透水係数 k_r は、割れ目にはさまれた岩自身の透水係数が割れ目のそれに比べて十分小さいとして無視すれば、割れ目の分布間隔 (spacing) s を考慮して次式のように書ける。

$$k_r = k_f \cdot \frac{2d}{s} = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{d^3}{s} \quad (2)$$

Snow⁽⁴⁾ は岩盤内の割れ目幅 $2d$ が、それに垂直に加わる有効応力に対して弾性的に変化すると仮定して上記の平行平板モデルを発展させ、岩盤を図-2に示すような、弾性球の介在する、2つの鉛直割れ目 f_2 、 f_3 と1つの水平割れ目 f_1 によって分離されたブロックによりモデル化し、鉛直方向の全応力が一定という条件のもとに、間隙水圧 p_f の変化を考慮して、各々の割れ目による岩盤の透水係数を次のように導いた。

$$k_1 = k_{01} + \frac{g}{\nu} \cdot \frac{d_{01}^2}{C_1 \cdot s_{01}} \cdot \Delta p_f \quad (3)$$

$$k_i = k_{0i} + \frac{g}{\nu} \cdot \frac{d_{0i}^2}{E_r + C_i \cdot s_{0i}} \cdot \Delta p_f \quad (i = 2, 3)$$

ここに、 $\Delta p_f = p_f - p_{f0}$ 、 p_{f0} ：基準となる間隙水圧で、そのときの各量には添字 0 を付けて表す。また、 Δ ：基準値からの変化量、 i ：図-2 中の割れ目の番号、である。すなわち、 k_1 ：間隙水圧 p_f のときの割れ目 i による岩盤の透水係数、 k_{0i} ：基準の間隙水圧 p_{f0} における割れ目 i による岩盤の透水係数、 s_{0i} 、 d_{0i} ： p_{f0} のときの割れ目 i の分布間隔、及び、割れ目幅の 1/2、 C_i ：割れ目 i の変形係数、 E_r ：岩の弾性係数、である。 Δ 、 i 、 o 等の記号は、以後、上記のような約束に従うものとする。さて、Snow が割れ目幅 $2d$ が間隙水圧に対して線型に変位すると仮定していること、及び、平行平板モデルによる岩盤の透水係数が(2)式で示されることを考えれば、 k_i は Δp_f の 3 乗に比例するはずで(3)式はこれに矛盾している。そこで著者らは、新たに、間隙水圧、及び、全応力の両者の変化を考慮しうる透水係数式を導く。

図-2 のようなブロックモデルのうちの 1 つのブロックと、それを包む割れ目を取り出すと、図-3 に示すような全応力 p_{ti} が各方向から加っていると考えられる。図中、割れ目の分布間隔 s_i 、ブロックの辺長 s'_i 及び、割れ目幅 $2d_i$ の間には、次のような関係がある。

$$s_i = s'_i + 2d_i, \quad \Delta s_i = \Delta s'_i + 2\Delta d_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

次に、このときの割れ目応力状態を図-4 に示す。すなわち、割れ目に垂直に加わる全応力 p_t は、割れ目内に介在する物体に動く有効応力 p_c と間隙水圧 p_f によって受け持たれると考える。そこで、単位ブロック内では各割れ目内の間隙水圧は等しいと仮定すると、全応力 p_t 、有効応力 p_c 、間隙水圧 p_f の関係は、次のように表すことができる。

$$p_{ti} = p_f + p_{ci}, \quad \Delta p_{ti} = \Delta p_f + \Delta p_{ci} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

そこで、割れ目間に存在する介在物を弾性体の角柱であるとすれば、全応力 p_{ti} 、間隙水圧 p_f のときの割れ目幅の、基準状態からの変位量 $\Delta 2d_i$ は次式のようになる。

$$\Delta 2d_i = -\frac{2d_{0i}}{a_i \cdot E_c} \cdot \Delta p_{ci} + \frac{2d_{0i} \cdot M_c}{E_c} \cdot \Delta p_f \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

ここに、 a_i ：介在柱の断面積が割れ目の面積に占める割合、 E_c ：介在柱の弾性係数、 M_c ：介在柱のポアソン比、である。また、 a_i は変位の過程で変化せず、 $a_i \ll 1$ で、介在柱自体は割れ目中の流れに影響を及ぼさないものとする。次に、(6)式に(5)式を代入して、 p_{ci} を消去し、 $a_i \cdot M_c \ll 1$ を考慮すると、 $\Delta 2d_i$ は結局、次式のように表わせる。

$$\Delta 2d_i = \frac{2d_{0i}}{a_i \cdot E_c} \cdot (\Delta p_f - \Delta p_{ti}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (7)$$

また、割れ目によって分離されたブロックの辺長 s'_i の変位量 $\Delta s'_i$ は、図-3 のような状態を考えて、

$$\Delta s'_i = -\frac{s'_{0i}}{E_r} \cdot \Delta p_{ti} + \frac{M_r \cdot s'_{0i}}{E_r} \cdot \Delta p_{tj} + \frac{M_r \cdot s'_{0i}}{E_r} \cdot \Delta p_{tk} \quad \left(\begin{matrix} i = 1, 2, 3 \\ j = 1, 2, 3 \\ i \neq j \neq k \end{matrix} \right) \quad (8)$$

となる。ここに、 E_r ：ブロックの弾性係数、 M_r ：ブロックのポアソン比、である。

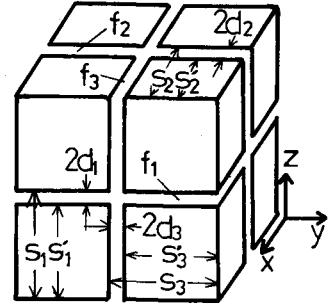


図-2 ブロックモデル

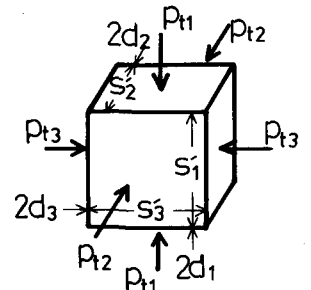


図-3 ブロックに働く力

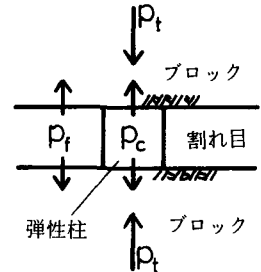


図-4 割れ目モデル

したがって、(7)式、(8)式を、(4)式に代入すれば、割目分布間隔 s の変位量 Δs を求めることができる。ところで、岩盤が水平方向に半無限に広がっているとすれば、水平方向の変位は周囲の岩盤によって拘束されることにより生じないと考えられる。このことは、鉛直割れ目 f_2 、 f_3 の分布間隔 s が変化しないことを意味する。したがって、

$$\Delta s_i = \Delta s'_i + \Delta 2 d_i = 0 \quad (i = 2, 3) \quad (9)$$

となる。そこで(7)式、(8)式を(9)式に代入し、 Δp_{t2} 、 Δp_{t3} を消去し、鉛直割れ目 f_2 、 f_3 の割れ目幅の変位量 $\Delta 2 d_2$ 、 $\Delta 2 d_3$ を、 Δp_{t1} と Δp_f で表すと、次式のようなになる。

$$\Delta 2 d_i = s_{0i} \cdot \left(\alpha_{i1} \cdot \frac{\Delta p_f}{E_r} - \alpha_{i2} \cdot \frac{\Delta p_{t1}}{E_r} \right) \quad (i = 2, 3) \quad (10)$$

ここに、

$$\alpha_{i1} = \frac{(1 - M_r) \cdot \{ (1 + M_r) \cdot \lambda_{j+1} \}}{(\lambda_i + 1) \cdot (\lambda_j + 1) - M_r^2 \cdot \lambda_i \cdot \lambda_j} \quad \alpha_{i2} = \frac{M_r \cdot \{ (1 + M_r) \cdot \lambda_{j+1} \}}{(\lambda_i + 1) \cdot (\lambda_j + 1) - M_r^2 \cdot \lambda_i \cdot \lambda_j} \quad \left(\begin{matrix} i = 2, 3 \\ j = 2, 3, i \neq j \end{matrix} \right)$$

であり、さらに

$$\lambda_j = a_i \cdot \frac{E_c}{E_r} \cdot \frac{s'_{0i}}{2 d_{0i}} = a_i \cdot e_c \cdot \frac{s'_{0i}}{2 d_{0i}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

である。一方、水平割れ目 f_1 の割れ目幅の変位量 $\Delta 2 d_1$ は、(6)式を $i = 1$ について書き下して

$$\Delta 2 d_1 = \frac{2 d_{01}}{a_1 E_c} \cdot (\Delta p_f - \Delta p_{t1}) \quad (12)$$

となる。また、岩盤は鉛直方向には変位が許されるので、水平割れ目 f_1 の分布間隔 s_1 の変位量 Δs_1 を考慮しなければならない。そこで、(10)式、(7)式、(8)式、(12)式を(4)式に代入して、 Δs_1 を求めると

$$\Delta s_1 = s'_{01} \cdot \left(\alpha_{11} \cdot \frac{\Delta p_f}{E_r} - \alpha_{12} \cdot \frac{\Delta p_{t1}}{E_r} \right) \quad (13)$$

ここに、 $\alpha_{11} = M_r (2 - \lambda_2 \cdot \alpha_{21} - \lambda_3 \cdot \alpha_{31}) + 1/\lambda_1$ 、 $\alpha_{12} = 1 - M_r \cdot (\lambda_2 \cdot \alpha_{22} + \lambda_3 \cdot \alpha_{32}) + 1/\lambda_1$ である。

ところで、全応力 p_{ti} 、間隙水圧 p_f のときの各々の割れ目の幅 $2 d$ 、及び、分布間隔 s_i は

$$2 d_i = 2 d_{0i} + \Delta 2 d_i, \quad s_i = s_{0i} + \Delta s_{0i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (14)$$

で、表わされるので、(14)式に、(9)式、(10)式、(12)式、(13)式を代入し、さらに、(2)式を考慮すれば全応力、及び、間隙水圧の変化を考慮した割れ目による岩盤の透水係数式は、結局、次のように求まる。

$$k_1 = k_{01} \cdot \frac{\left[1 + \frac{1}{a_1 \cdot e_c} \left\{ \frac{\Delta p_f}{E_r} - \frac{\Delta p_{t1}}{E_r} \right\} \right]^3}{1 + \frac{s'_{01}}{s_{01}} \left\{ \alpha_{11} \cdot \frac{\Delta p_f}{E_r} - \alpha_{12} \cdot \frac{\Delta p_{t1}}{E_r} \right\}}, \quad k_i = k_{0i} \cdot \left[1 + \frac{s'_{0i}}{2 d_{0i}} \left\{ \alpha_{i1} \cdot \frac{\Delta p_f}{E_r} - \alpha_{i2} \cdot \frac{\Delta p_{t1}}{E_r} \right\} \right]^3 \quad (i = 2, 3) \quad (15)$$

ここに、

$$k_{0i} = \frac{2}{3} \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{d_{0i}^3}{s_{0i}} \quad (i = 1, 2, 3)$$

である。

1-2 岩盤浸透流の基本式

ブロックモデルを考慮した岩盤浸透流の基本式は、体積要素中の流体質量の収支を考えることによって、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_f \cdot \frac{\partial h}{\partial t} - S_t \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16)$$

となる。ここに、

$$S_f = \left\{ \frac{n}{e_w} + \eta_1 + n \cdot \frac{s'_{01}}{s_{01}} \alpha_{11} + \frac{s'_{02}}{s_{02}} \alpha_{21} + \frac{s'_{03}}{s_{03}} \alpha_{31} \right\} \cdot \frac{r_w}{E_r} \quad e_w = \frac{E_w}{E_r}$$

$$S_t = \left\{ \eta_2 + n \frac{s'_{01}}{s_{01}} \cdot \alpha_{12} + \frac{s'_{02}}{s_{02}} \alpha_{22} + \frac{s'_{03}}{s_{03}} \alpha_{32} \right\} \cdot \frac{r_w}{E_r}, \quad n = \frac{2d_1}{s_1} + \frac{2d_2}{s_2} + \frac{2d_3}{s_3}$$

$$\eta_i = \frac{\frac{s_{01}}{s'_{01}} - \frac{1}{2} \cdot a_1 \alpha_{1i} + \frac{1}{e_c^2} \cdot (\alpha_{11} - \alpha_{12}) \cdot \frac{r_w}{E_r} \cdot \Delta h_t}{a_i \cdot \frac{s'_{01}}{2d_{01}} \cdot \left\{ \frac{s_{01}}{s'_{01}} + a \cdot \frac{r_w}{E_r} \cdot \Delta h - \alpha_{12} \cdot \frac{r_w}{E_r} \cdot \Delta h_t \right\}^2} \quad (i = 1, 2)$$

であり、 h : ピエゾ水頭、 h_t : 全応力 p_{t1} の水頭値、 $S_f \cdot S_t$: 貯留係数、 n : 間隙率、 E_w : 水の体積弾性係数、 r_w : 水の単位体積重量、 k_x, k_y, k_z : x, y, z 方向の透水係数である。ここで、図-2を参照して、 k_x, k_y, k_z は次式で表すことができると仮定する。

$$k_x = k_1 + k_3, \quad k_y = k_1 + k_2, \quad k_z = k_2 + k_3 \quad (17)$$

また、一般に、岩盤の全応力の非定常変化は無視し得るので、浸透流を鉛直2次元流と考え得るとき、(16)式は次のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_f \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18)$$

2 モデルの性質と実測との比較

本モデルが有効応力の変化による透水係数の変化をどの程度説明できるかを、ルジオン試験によって得られた深度と透水係数の分布のデータとの比較によって論じる。実際に地盤では深度にともなう全応力、及び、間隙水圧が増加する。いま、近似的に地表面と地下水面が一致している場合について考え、深さ方向に z をとると、深度 z における全応力 p_{t1} 、間隙水圧 p_f は、次式で与えられる。

$$p_{t1} = r_r \cdot z, \quad p_f = r_w \cdot z \quad (19)$$

ここに、 r_r : 岩の単位体積重量、である。そこで、モデルとして簡単のために、立方体ブロック ($s_{01} = s_{02} = s_{03}$) を考え、各割れ目による透水係数が 10^{-3} cm/sec を与えるような分布間隔 s を、表-1に示すような3ケースにとり、各ケースについて、(15)式、(19)式から深度にともなう透水係数の変化を求めたのが図-5である。ここに、 $E_r = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, $r_r = 2.5 \text{ g/cm}^3$, $r_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$, $M_r = 0.3$, $a \cdot e_c = 0.0002$, で各割れ目で等しい、としている。この図より、水平割れ目 f_1 では有効応力の増加によってその透水係数が著しく低下するが、鉛直割れ目 f_2, f_3 では、それほど大きな低下は生じない。また、水平割れ目 f_1 では分布間隔 s の違いによる透水係数の変化特性にほとんど差はないが、鉛直割れ目 f_2, f_3 では、分布間隔 s が大きいものほど透水係数の変化が大きいう傾向が見られる。次に、パラメータ $a \cdot e_c$ の性質を検討するため、 $c-2$ について、 $a \cdot e_c$ の値を3種類とり、各々について深度 z と水平割れ目による透水係数 k_1 との関係を求めたのが図-6である。これより、 $a \cdot e_c$ の値が大きいほど、すなわち、介在柱の占める面積が多いほど、また介在柱の弾性係数が岩のそれに比べて大きいほど、透水係数 k_1 の変化の仕方がゆるやかであり、 $a \cdot e_c$ が割れ目幅の変位特性を支配する重要なパラメーターであることが判る。

次に、上記のようにして、本モデルから求めた深度 z にともなう透水係数 k_1 の変化と、小島ら⁽²⁾ が花コウ岩地城におけるルジオン試験結

表-1 計算に用いたモデル

CASE	s_0 cm	d_0 $\times 10^{-3}$ cm	n_0 $\times 10^{-4}$	$S_f s_0$ $\times 10^{-9}$ cm/sec	k_0 cm/sec
C-1	10	5.85	35.0	34.7	10^{-3}
C-2	100	12.5	7.50	9.79	
C-3	1000	27.1	1.63	3.00	

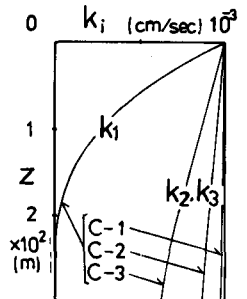


図-5 $k_i \sim z$ の関係

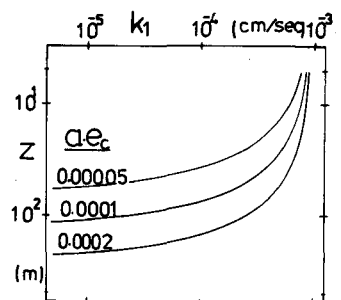


図-6 $a \cdot e_c$ の値の影響

果からまとめた深度方向の透水係数の分布の実測データと比較すると、図-7 のようになる。図中には、A、B の2地点での実測データが示されており、各々の地域に対して、本モデルから求めた透水係数 k_1 の変化曲線を併記している。これより、パラメーター $a \cdot e_c$ を適当に選ぶことによって、本モデルで実際の透水係数の変化を説明できることが判り、ある程度の妥当性を見出すことができよう。

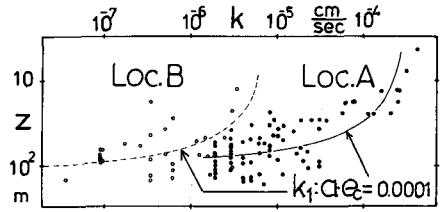


図-7 ルジオン試験値との比較

3 地下空洞の水理解析への適用

本モデルを地下空洞の水理解析に適用し、間隙水圧の変化にともなう透水係数の変化が岩盤浸透流に及ぼす影響について検討する。解析モデルは図-8 に示すような水底空洞で、 $H_s = 100$ m、 $H = 200$ m、 $T_h = T_v = 20$ m、 $H_d = 70$ mとし水平方向の境界は、 $x = 400$ mの位置に設け、そこでは間隙水圧が静水圧分布であるとしている。解析は、(18)式を差分化し、SOR 法によって

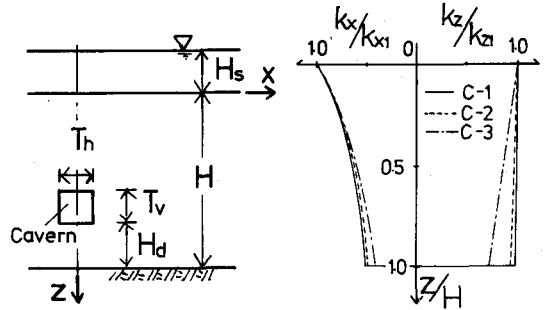


図-8 水底空洞モデル

図-9 $k_x, k_y \sim z$ の関係

行なった。その際、近似的に岩盤の全応力は掘削の影響をうけないものとした。また、ブロックモデルの諸量は、表-1 のものと同じである。図-9 は $k_x (= k_1 + k_2)$ 、 $k_z (= k_2 + k_3)$ の初期条件で、ここに、 k_{x1} 、 k_{z1} は水底すなわち $z/H=0$ の位置での透水係数である。すでに述べた k_1 、 k_2 、 k_3 の性質により、 k_x の方が k_z よりも変化が大きく、また両者とも分布間隔 s の大きい方が変化が大きいということが判る。

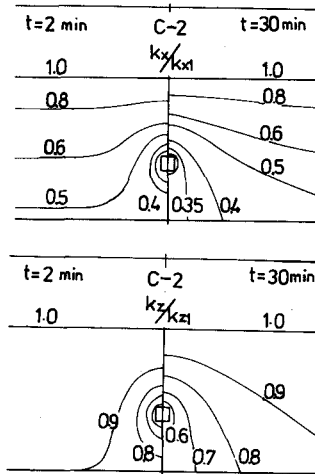


図-10 k_x, k_z の非定常変化

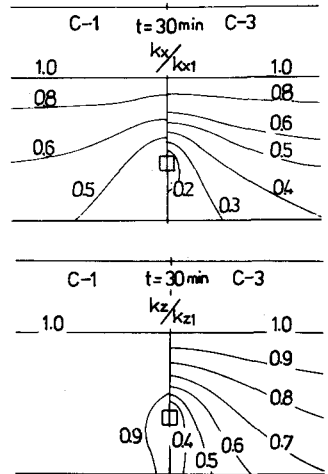


図-11 定常状態での k_x, k_z

次に空洞の掘削にともなう間隙水圧の変化によって生じる k_x 、 k_z の非定常変化を $c-2$ について図-10に示す。図中 t は掘削からの時間である。このような岩盤の性質として、貯留係数が極めて小さいので解析例の様な水底空洞ではその非定常性は実際上ほとんど無視しうるが、この図より、透水係数の低い部分が短時間の間に空洞周辺から広がっていく様子がよく判る。同様に、 $c-1$ 、 $c-3$ についてほぼ定常状態と思われる $t = 30$ minでの $k_x \cdot k_z$ の分布を図-11に示す。図-10の $c-2$ の同時刻のものも含めて考えると、割れ目の分布間隔 s の大きいものほど、透水係数 $k_x \cdot k_z$ の低下が著しいことが判る。

さて、このような透水係数の変化が空洞への湧水量に与える影響を図-12に示す。図中、実線は本モデルを考慮した3ケースについての湧水量である。このように p_{f0} 、 p_{t01} において同じ透水係数を与える

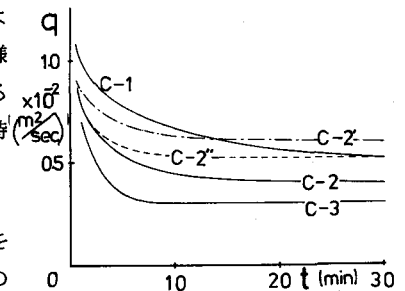


図-12 非定常湧水量

モデルでも、割れ目の分布間隔 s が小さいものほど定常状態への遷移がゆるやかで、かつ湧水量は大きい。これは、表-1 に示したように、 s が小さいものほど貯留係数 S_f の値が大きいことと、図-10、図-11 に示したような透水係数 k_x 、 k_z の分布のためである。また、図中、点線で示した $c-2'$ は、 $c-2$ において透水係数が全断面で k_{x1} 、 k_{z1} で一定の場合、 $c-2'$ は $c-2$ で深度方向の透水係数分布のみを考慮した場合、の湧水量で、 $c-2$ 、 $c-2'$ 、 $c-2''$ の間には顕著な差が見られ、透水係数の深度分布や間隙水圧の変化による透水係数の変化が浸透流に及ぼす影響が、無視し得ないものであることが判る。

しかしながら、このような結果をそのまま実際の地下空洞の水理現象として捉えることはできない。すなわち、実際には空洞を掘削すると岩盤内の応力状態は変化し、特に空洞周辺ではゆるみ帯が発生する。そのような領域に本モデルを適用すれば、当然、透水係数は大きくなるはずであるが、本解析では空洞掘削にともなう全応力の変化を考慮していない。したがって本解析の結果は、空洞掘削にともなう全応力の変化の小さな部分、たとえば、ゆるみ帯よりも外側の領域において実際の現象を説明していると考えられる。

おわりに

Snow のモデルに若干の修正を加え、有効応力の変化にともなう透水係数の変化を表す式を導き、その妥当性をルジオン試験から求めた深度にともなう透水係数の分布のデータと比較することによって吟味した。その結果、本モデルによって透水係数の深度にともなう変化を、ある程度説明できることが判り、第1次近似としての本モデルの妥当性が確かめられた。そこで、本モデルを考慮して導いた岩盤浸透流の基本式を、水底空洞の水理解析に適用し、有効応力の変化が岩盤浸透流に及ぼす影響を調べた結果、空洞掘削によって生じる間隙水圧の変化にともなう有効応力の変化が、岩盤内の透水係数の分布に大きな変化をもたらし、そのために空洞への湧水特性にかなりの影響を与えることが判った。これより、岩盤浸透流の解析にあたり、有効応力の変化にともなう透水係数の変化を考慮することの必要性を明確にしたと考える。

しかしながら、モデル自体に関しては、実際には、パラメーター $\alpha \cdot e_c$ をどのように見積るか、また、割れ目幅の非線型的な変位を考慮していない、解析に関しては、空洞掘削にともなう岩盤の2次応力状態、特にゆるみ帯を考慮していない、等の問題点が残されており、これらを今後の検討課題として研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Witherspoon, P. A, etc, Observations of a potential size effect in experimental determination of hydraulic properties of fractures, Water Resources Research, vol. 15, No. 5, pp 1142 - 1146 (1979)
- 2) 渡辺邦夫, 小島圭二, 断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価, 日本応用地質学会講演会, pp 2 - 16 (1980)
- 3) Pratt, R, etc, Elastic and transport properties of an in situ jointed granite, J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. vol. 14, pp 35 - 45 (1977)
- 4) Snow, D. T, Fracture deformation and change of permeability and storage upon change of fluids pressure. Colo. Sch. Mines Q, vol. 63, pp 201 - 244 (1968)