土木学会第41回年次学術講演会（昭和61年11月）

III-187

節理性岩盤の等価な透水係数の評価について

大成建設（株）　（正）　下茂　道人　（正）　亀村　勝美

1．はじめに

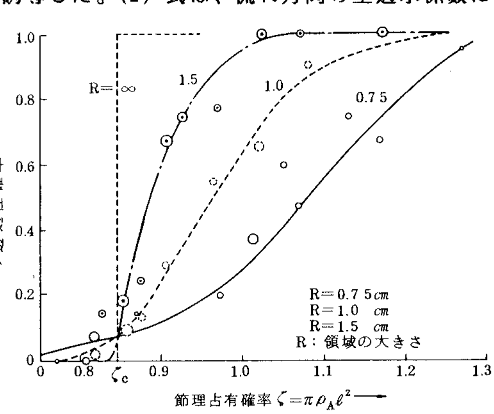
岩盤の透水性は、ダム、地下備蓄タンク、放射性廃棄物処分等、岩盤を対象とした構造物の設計や、施設の安全性評価において基本的に重要となるパラメータの一つである。節理性岩盤の透水性に影響を与える代表的な要因としては、(a) 節理の幾何学的特性（節理密度、方向、面積、開口幅等）、(b) 節理表面形状の不規則性、(c) 充填物、(d) 応力場、等が挙げられ、これらを考慮した評価手法の確立が望まれている。節理性岩盤内の地下水挙動の予測モデルとしては大別して不連続体モデルと連続体モデルの２種類がある。前者のモデルは、個々の節理特性を直接解析に取りこめるという点で優れているが、広い領域の岩盤を対象とした地下水挙動の予測を行なう上では、必ずしも現実的でない。本報告では、特に節理の幾何学的特性が岩盤の透水性に与える影響に着目し、これまで示されたいくつかの等価連続体モデルについて概説した後、パーコレーション理論の適用による、より現実的な、等価透水係数の評価手法について議論する。

2．岩盤内節理分布と節理の連続性について

節理を主たる透水径路とするような岩盤においては、節理の連続性が、岩盤全体の透水性に大きく影響を及ぼすことは、容易に想像される。Englman [1]らは、節理の幾何学的特性と、連続性の関係を、人工的に発生させた２次元節理系を用いて観察し、図－１に示すような結果を得た。図中、横軸は、節理占有確率パラメータ　$\zeta=\pi\rho_A\ell^2$　（ρ_A ：平面内節理密度［本／cm²］、ℓ ：節理トレース長［cm］）であり、横軸は、透過性確率（領域の両端を継なぐ、連続した径路が存在する確率）である。この図において注目される点は①パラメータζと、節理の連続性の間に明確な関係があり、②その関係は、領域の大きさに依存する。また、③領域が無限大となるときには、$\zeta=\zeta_C$ となる限界値を境に、岩盤内の節理系は、無限に連続する径路を形成し、不連続から連続へと急激に変化するという事である。このように、節理の連続性は、節理密度に対して、相変化とも言えるクリティカルな特性を有する事が示された。このことより、岩盤を連続体としてみなした時の、等価な透水性の評価を行なう上で、節理の連続性に見られるクリティカルな特性や、節理密度等への依存性を考慮する事が必要となることが分かる。

3．等価な透水係数の評価手法

節理性岩盤の等価な透水係数の評価手法に関して、先駆的な研究を行ったのはSnow[2]である。彼は、無限の拡がりを有する平行板で節理をモデル化し、三乗則により計算される個々の節理の透水性への寄与を重ね合わせることにより、(1) 式のような２階の透水テンソルを誘導した。(2) 式は、流れ方向の主透水係数について(1) 式を変形したものである。snowの式においては、無限長節理の仮定により、すべての節理は完全に連続している事になり、過大評価された透水係数が得られる。近年、小田ら[3]は、Snowの研究を基に、個々の節理内の流速を体積平均し、かつクラックテンソルの考えを導入することにより、有限長の節理系に対する一般的な透水テンソルを　(3) 式のように求めた。(3) 式から、流れ主方向の透水係数を求めると(6) 式のようになり、これを(2) 式と比較することにより、小田らの方法は、本質的にSnowの式における無限長節理系の空隙率ϕを、有限長節理系の空隙率ϕ_f で置き換えたものに等しいことが分かる。一方、小田らも指摘しているように、本式においても、計算される



図－１　節理占有確率と透過性確率の関係[1]

透水係数は、実際の透水係数よりいくらか大きめの値を示す。また、前節に述べたように実際の岩盤では、あるζの値以下では、透水性が零となる領域が存在するはずである。この差異に関る大きな要因として考えられるのは、上記の手法において、流れに寄与しない節理部分すなわち、dead-end部の存在を考慮していない事が考えられる。Robinson[4]は、これまで半導体工学や高分子工学の分野で用いられたパーコレーション理論の適用により、dead-end部を除いた部分の空隙率εが(9) 式で計算できる事を示した。一方、Kirkpatrikら[5]は有効媒体理論により、dead-end部の存在による透水係数の低減率fが、(8) 式のように有効空隙率εと、交叉部に連結する径路の数Zの関数で求められる事を示した。今、低減率fに方向依存性がないと仮定すると、小田らの透水テンソルは、(7) 式のように変形される。特に、2次元問題において、流れの主方向の透水係数は、(10)式のように与えられる。(7) 式、(10)式とも、その極限においてはSnowの式との整合性を保っている。なぜならば、$\rho\ell^2$ の増加と伴に、低減率fの値は、1に近づくからである。

4．評価式の適用性について

上記の透水係数の評価式の適用性を検討するために、Long[6]らの行った空隙率一定条件下（ϕ_f ＝一定）における2次元場での数値解析結果との比較を行った（図－3）。同図中には、Longらの用いた節理分布条件及び数値解析結果の他に、(2) 式、(10)式の評価式により計算されたζと平均透水係数の関係が示されている。尚、(10)式におけるλの値としては、Robinsonが、ランダムな方向分布を有する2次元節理系に対して求めた $\lambda=\frac{2}{\pi}\rho_A\ell^2$ を近似的に用いた。図－3より(10)式は、数値解析によって得られた、透水限界値ζ_c および、ζの増加に伴う透水係数の増加傾向と、非常に良い一致を見ている。これより、パーコレーション理論により、節理性岩盤の透水性をより合理的に評価できる事が明らかになった。

5．おわりに

本報告で示した、パーコレーション理論による、節理性岩盤の透水性の評価手法は、今回示した例以外にも、より一般的な、節理分布特性を有する場合や、3次元問題においても適用が可能であると考えられるため、今後は、より実用的な透水性の評価手法の確立を目指して引き続き検討を行っていく所存である。

SNOWの方法：無限長節理系

$$K^s_{ij}=\frac{g}{12\nu}\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i^3}{n_i D_i}(\delta_{ij}-n_in_j) \qquad (1)$$

$$K^s=\frac{\phi g t_0^2}{12\nu}\overline{\cos^2\theta} \qquad (2)$$

n：節理数　n_i：方向余弦　t：開口幅

D_i：節理間隔　θ：節理と流れ方向のなす角度

ϕ：無限長節理の空隙率（＝nto／Do）

クラックテンソル：有限長節理系

$$K^c_{ij}=\frac{g}{12\nu}(P_{kk}\delta_{ij}-P_{ij}) \qquad (3)$$

$$P_{ij}=\frac{\pi\rho}{4}\int_0^\infty\int_0^\infty\int_\Omega r^2\ t^3\ n_in_jE(n,r,t)\,d\Omega\,dr\,dt \qquad (4)$$

$$P_{kk}=P_{11}+P_{22}+P_{33} \qquad (5)$$

$$K^c=\frac{\phi_f g t_0^2}{12\nu}\overline{\cos^2\theta} \qquad (6)$$

ϕ_f：有限長節理の空隙率$=\frac{\pi\rho r_0^2\ t_0}{4}$　（3次元）

$=\rho_A\ell_0\ t_0$　（2次元）

パーコレーション理論：Dead-end部の排除

$$K^p_{ij}=f\,k^c_{ij}=\frac{fg}{12\nu}(P_{kk}\delta_{ij}-P_{ij}) \qquad (7)$$

f：低減率 $\left(=1-\frac{Z\varepsilon}{Z-2}\right)$ (8)

2次元

ε：dead-end部を除いた有効空隙率

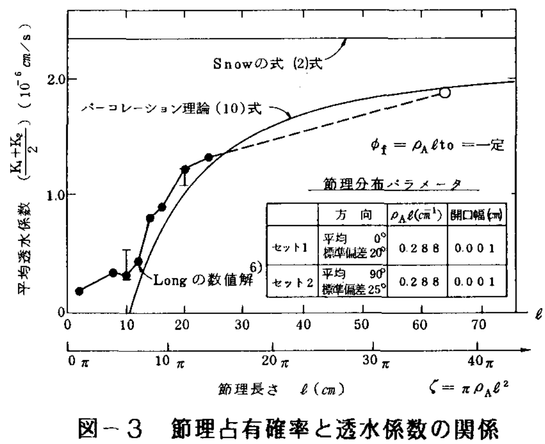
$\left(=\frac{2}{\lambda}-e^{-\lambda}\left(1+\frac{2}{\lambda}\right)\right)$ (9)

λ：単一節理当りの節理交叉数

Z：コーディネーション数（＝4）

$$K=\frac{f\phi_f g t_0^2}{12\nu}\overline{\cos^2\theta} \qquad (10)$$

図－2　等価な透水係数の評価式



図－3　節理占有確率と透水係数の関係

6．参考文献

1)R.Englman, Y. Gur, Z.Jacger "Fluid Flow Through a crack Network in Rocks " J. of Applied Mechanics, Transaction of ASME, Vol.50, pp.707 to 711, Dec.1983

2)D. T. Snow, "Rock Fracture Spacings, Openings and Porosities " J. of the Soil Mech. and Found. Div. of ASCE, Vol SM1, PP. 73, 1968

3)小田、前渋　"クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価" 第6回　岩の力学国内シンポジウム, pp. 121 ～126, 1984

4)P.C. Robinson, "Connectivity, Flow and Transport in Notwork Models of Fractured Media " , Ph. D. Thesis, Oxford Univ., 1984

5)Kirkpatrick, S. "Classical Transport in Disordered Media : Scaling and Effective-Medium Theories" Physical Review Letters Vol. 27(25)p1722, 1971

6)J. C. Long et al. "Hydrologic Behavior of Fracture Networks" , 17th cogress of Int. Assoc. of Hydrogeologsts Tucson, Arizona, Jan, 1985