

III-492

水理学的異方性媒体のルジオン値について

CRC 総合研究所 正会員 中屋 眞司

1. はじめに

岩盤は水理学的に見ると亀裂などの地質学的な構造のため、不均質で異方性を持つ媒体と考えられる。一方、ルジオン値は岩盤を均質な等方性媒体と仮定した理論から導かれたもので、岩盤の透水性の解釈をより不鮮明にしている。ここでは、岩盤を水理学的に等価な均質で異方性をもつ多孔質媒体と仮定し、異方透水係数テンソル, k_{ij} からルジオン値を決定する理論を展開する。

2. ルジオン試験による注水現象の理論的アプローチ

ルジオン試験、およびパッカー試験のようなボーリング孔を利用した注水試験を理論的に説明するため、無限媒体内に点湧源を考える。注水試験による注水現象は、点湧源あるいは点湧源のつながった線湧源に関するポテンシャル流と考え、無限速で $\Delta\phi=0$ の条件のもとでボーリング壁面でのポテンシャル増分 $\Delta\phi$ を解く。媒体が水理学的異方性を持つとき、無限媒体内のある一点に原点を取り、原点に流量密度 q の湧源を考えると、任意の点 x_i の定常ポテンシャル増分 $\Delta\phi(x_i)$ は、次式で表わされる¹⁾。

$$\Delta\phi(x_i) = \frac{q}{4\pi(M_{xx})^{1/2}}, \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

ここに、 $M_{xx} = x^T A x = x_i x_j A_{ij}$, ($i, j=1, 2, 3$), $A_{ij} = A_{ji} = k_{ik} k_{jk} - k_{ij} k_{kk}$,
 $A_{ii} = k_{jj} k_{kk} - k_{jk}^2$, $D = |k| = k_{11} k_{22} k_{33} + 2k_{12} k_{23} k_{31} - k_{11} k_{22}^2 - k_{22} k_{13}^2 - k_{33} k_{12}^2$, k_{ij} : 透水係数テンソル

ボーリング軸を z 軸として、図-1に示す注水区間の中央のボーリング壁面上の点 $p(x_p, y_p, L/2)$ のポテンシャル増分 $\Delta\phi_p$ は、式(1)で表わされる点湧源を z 軸に沿って積分し、 z 軸に沿う点湧源の点 p への寄与を総和したものととして求めると、注入量 Q の下で次式が得られる。

$$\Delta\phi_p = 2 \int_0^{L/2} \Delta\phi(x_p, y_p, \xi) dz, \quad \xi = L/2 - z \quad (2)$$

$\Delta\phi_p$ の値は $z=L/2$ のボーリング孔周上の位置で変化することから、 $\Delta\phi_p$ を円周方向の平均をとって H とすると、

$$H = \frac{1}{\pi r_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{L/2} \Delta\phi(x, y, \xi) dz \cdot d\theta \quad (3)$$

と表わすことができる。ここに、ボーリング孔半径を r_0 として、 $x = r_0 \cdot \cos \theta$, $y = r_0 \cdot \sin \theta$, θ : xy 面上の回転角、 $Q = qL$ である。式(3)が水理学的異方性多孔質媒体のルジオン試験の注入圧 H と注入量 Q を評価する方程式である。

3. ルジオン値と透水係数テンソル

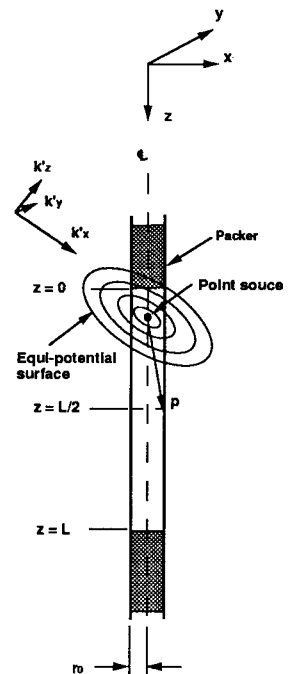


図-1 ルジオン試験

式(3)より異方性多孔質媒体のルジオン試験の注入圧 H と注入量 Q が得られる。そこで、式(3)の評価式の妥当性を検討するために、まず、等方性媒体について、区間長 L をいろいろ変えて Q と H 、および透水係数 k の関係を計算した。 k は等方性媒体の注入試験の式(4)²⁾に Q と H を代入して求めた。結果を、表-1に示す。式(3)から得た注入圧 H と注入量 Q の関係をを用いて求めた透水係数は、推定誤差2%程度で真値と一致している。

$$k = \frac{Q}{2\pi HL} \sinh^{-1} \left(\frac{L}{2r_0} \right) \quad (4)$$

次に、異方性媒体について式(3)の妥当性を検討する。有限要素法によって注水試験の数値実験を行い、得られた注入量と注入圧を式(4)に代入して決

表-1 等方性媒体の透水係数 ($k=10^{-8}\text{m/s}$)

L (m)	Q (m^3/s)	H (m)	k (10^{-8}m/s)
19.87	2.31×10^{-5}	114.7	0.990
9.890	1.15×10^{-5}	101.8	0.989
4.902	5.70×10^{-6}	88.78	0.988
1.806	2.10×10^{-6}	70.32	0.984
0.774	9.00×10^{-7}	54.71	0.979

$$r_0 = 4.3\text{cm}$$

定した透水係数 k_F と、式(3)で計算した注入量と注入圧を同様に式(4)に代入して決定した透水係数 k_T を表-2にルジオン値 Lu とともに示す。 k_F と k_T は誤差30%で一致している。等方性媒体に関するNo.2の計算値をみると、FEMで11%の誤差を持つことから、FEMの結果は全て、真値から少なくとも10%程度の誤差を含んでいると判断される。FEMの結果に対し、式(3)で与えられる理論値は、表-1、表-2より2%程度の誤差である。以上より、式(3)はルジオン試験を少なくとも誤差30%以内で説明する評価式と考えられる。

4. まとめ

亀裂性岩盤を水理学的異方性媒体と考え、岩盤ルジオン試験の理論的説明を試みた。その結果、以下のようにまとめられる。

1. 水理学的異方性媒体のルジオン値を導く理論式を示した。

2. 理論式から評価したルジオン値は、真の値、およびFEM計算値とよく一致していた。

今後は、導いたルジオン試験の評価式の活用を図って行きたい。

表-2(a) 異方性媒体のルジオン試験のパラメータ

No	$k'x$	$k'y$ ($\times 10^{-8}\text{m/s}$)	$k'z$ ($\times 10^{-8}\text{m/s}$)	FEM		Theoretical	
				L (m)	r_0 (cm)	L (m)	r_0 (cm)
1	1	1	10	0.6	4.3	0.774	4.3
2	1	1	1	0.6	4.3	0.774	4.3
3	1	1	0.1	0.6	4.3	0.774	4.3
4	5	1	0.5	4	4.3	4.902	4.3
*5	601.	287.	503.	4	4.3	4.902	4.3
*6	3.32	8.597	6.707	3	4.3	4.902	4.3

*; 座標軸と透水主軸が一致していない多孔質媒体

参考文献

- 1) Hsieh, P. A. and S. P. Neuman (1985): Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 1 Theory, W. R. R., Vol. 21, No. 11, pp. 1655-1665.
- 2) Harr, M. E. (1962): Groundwater and Seepage, McGraw-Hill, pp. 259-262.

表-2(b) 異方性媒体のルジオン値

No	FEM				Theoretical				Lu_T/Lu_F
	H (m)	Q ($\times 10^{-9}\text{m}^3/\text{s}$)	k_F ($\times 10^{-8}\text{m/s}$)	Lu_F	H (m)	Q ($\times 10^{-9}\text{m}^3/\text{s}$)	k_T ($\times 10^{-8}\text{m/s}$)	Lu_T	
1	0.2	5.127	1.796	0.257	32.76	0.9	1.635	0.213	.829
2	0.2	3.177	1.11	0.159	54.71	0.9	0.979	0.128	.805
3	0.2	2.245	0.786	0.112	96.81	0.9	0.553	.0721	.644
4	163	20000	2.21	0.184	49.03	5.7	1.79	0.142	.772
5	43	1×10^6	419	34.9	0.207	5.7	424	33.8	.968
6	231	50000	4.87	0.432	82.35	28.5	5.32	0.423	.979