

(38) 正弦波圧力試験による岩盤の水理的異方性に関する一考察

Study on the hydraulic anisotropy of Rock Mass Using Sinusoidal Pressure Tests

本 島 勲

Isao MOTOJIMA

Sinusoidal Pressure Tests was performed in jointy bedrock and hydraulic anisotropy of rock mass was considered Using the result of this one.

From the consideration, it was found that hydraulic anisotropy of jointy rock mass are strongly influenced by the joint system and the direction of the maximum permeability for hydraulic anisotropy coincides with the dominant direction of open joints and water flow marked(ex.oxide of iron) joints.

I まえがき

岩盤の透水性は、岩盤の割れ目に依存する。この割れ目が不規則に数多く存在する場合には、水理的に等方均一な媒体として扱える。しかし、一般に岩盤の割れ目は、岩石の成因とその後の地質学的な履歴による規則性を有している。岩盤の透水性は、このような割れ目の性状に依存した水理的な異方性を有していると考えられる。

そこで、割れ目系岩盤で正弦波圧力試験を実施し、その結果を用いて岩盤の水理的な異方性を考察した。その結果、岩盤の水理的な異方性は割れ目の性状に支配され、水理的異方性を表わす透水楕円での最大透水係数の方向は、開口割れ目および割れ面に酸化鉄などが付着した地下水流動の痕跡をもつ割れ目の方向と合致することが明かとなった。

II 試験概要

2.1 正弦波圧力試験

正弦波圧力試験とは、複数の試験孔の内の1孔に正弦波状の圧力を加圧し、他孔でその圧力の応答 - 圧力の減衰、位相の遅れ(位相差) - を測定して、岩盤の透水係数や比貯留係数などの地下水理特性を求めるものである。

試験での圧力源には、点圧力源と有限な長さをもつ線圧力源とがある。ここでは実用的な線圧力源によることとした。この場合、透水係数や比貯留係数などはKelvin 関数を含む。試験結果より各定数を算出する手順を以下に示す。

① $r(\omega/\kappa)^{1/2}$ と Kelvin 関数の位相角 Φ_0 、絶対値 N_0 、および圧力の減衰 H_r/H_0 との関係を表す式を用いて作図する。

$$\frac{H_r}{H_0} = \frac{N_0 \left[r \left(\frac{\omega}{\kappa} \right)^{1/2} \right]}{N_0 \left[r_0 \left(\frac{\omega}{\kappa} \right)^{1/2} \right]}$$

$$\Phi = \Phi_0 \left[r_0 \left(\frac{\omega}{\kappa} \right)^{1/2} \right]$$

② 同図を用い、圧力の減衰 H_r / H_0 または位相角 Φ をもとに $r (\omega / \kappa)^{1/2}$ を求め、水頭拡散率 κ を算出する。水頭拡散率 κ は、2通り求まり、以下の透水係数、比貯留係数ともに2通り求まる。

③ つぎに、 $r (\omega / \kappa)^{1/2}$ をもとに、透水係数 k を次式により算出する。

$$k = \frac{Q_0}{2 \pi H_r L} \left[r_0 \left(\frac{\omega}{\kappa} \right)^{1/2} \right]$$

④ 最後に、算出された κ 、 k をもとに比貯留係数 S_s を次式により算出する。

$$S_s = \frac{k}{\kappa}$$

2.2 試験装置

正弦波圧力試験では、試験圧力を正弦波状に制御する必要がある。ここでは、正弦波圧力試験のために新たに開発した試験装置を用いた。

2.3 原位置試験

試験箇所は、地表面下 50 m 程度に位置し、割れ目（各孔平均 4.6 ~ 12.8 本/m）の発達した中生代の凝灰岩が分布する。BTV調査（Bore Hole Television System による割れ目調査）結果を図-1に、また試験孔の配置を図-2に示した。

正弦波圧力試験は、中心の NO.0 孔を加圧孔、周辺の NO.1 ~ 3 孔を受圧孔とし、地下水面以下を全試験区間（深度 10 ~ 30 m、試験長 20 m）として、圧力水頭（振幅）700 cm、周期 600 s、正弦波流量（振幅）375 cc/s で実施した。

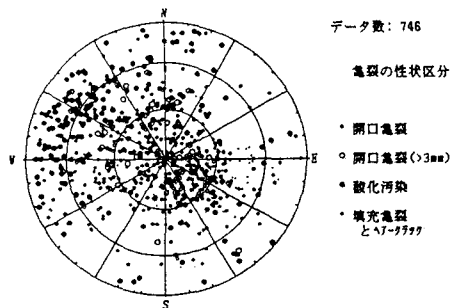


図-1 岩盤の割れ目性状（ウルフ網）

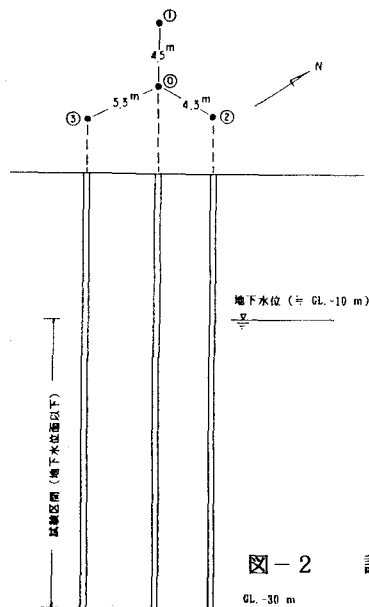


図-2 試験孔の配置

III 試験結果

正弦波圧力試験結果を表-1に示す。

表-1 試験結果

加圧孔				受圧孔			
NO.	周期	圧力水頭	正弦波流量	NO.	圧力水頭	圧力減衰	位相差
	s	H_0 cm	Q_0 cc/s		H_r cm	H_r / H_0	Φ deg.
0	600	700	375	1	250	0.357	21
0	600	700	375	2	340	0.488	9
0	600	700	375	3	340	0.488	9

試験結果より透水係数、水頭拡散率および比貯留係数を算出して表-2にまとめた。

表-2 透水係数、水頭拡散率および比貯留係数の算出結果

加圧孔 NO.	受圧孔 NO.	透水係数			水頭拡散率			比貯留係数		
		k_a $\times 10^{-4}$	k_ϕ cm/s	k	κ_a $\times 10^6$	κ_ϕ cm ² /s	κ	Ss_a $\times 10^{-10}$	Ss_ϕ 1/cm	Ss
0	1	3.3	2.6	2.9	0.29	0.09	0.16	11.1	29.3	20.1
0	2	4.0	4.3	4.2	16.1	31.9	24.0	0.25	0.14	0.19
0	3	4.0	4.1	4.1	14.7	31.9	23.3	0.27	0.27	0.20

k_a 、 κ_a 、 Ss_a : 圧力の減衰より算出
 k_ϕ 、 κ_ϕ 、 Ss_ϕ : 位相差より算出
 k 、 κ 、 Ss : 圧力の減衰および位相差より算出した結果の平均

算出した透水係数を図-3に図示した。同図の透水係数は、圧力の減衰と位相差とにより算出した結果の平均値である。透水係数の平方根を加圧孔と受圧孔との各方向に実線で、また、同一方向での透水係数は同じであるとして、その対象となる方向に同じように破線で示した。

IV 考察 - 岩盤の水理的異方性 (透水テンソル) と割れ目性状-

4.1 透水テンソル

試験結果より透水テンソルを求め表-3にまとめた。図-4は、透水テンソルを図示したものである。同図には、図-3に示した各方向の透水係数と磁北を併せて示してある。

表-3 透水テンソル

最大透水係数	最小透水係数	等方向一等価透水係数	異方性	方向
k_{max} cm/s	k_{min} cm/s	k cm/s	$\sqrt{k_{max} / k_{min}}$	(最大透水係数)
4.8×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.8×10^{-4}	1.269	N 35.6° E

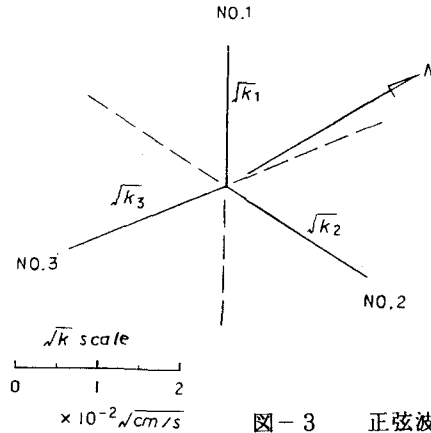


図-3 正弦波圧力試験による透水係数

最大透水係数は $k_{Max} = 4.8 \times 10^{-4}$ cm/s、最小透水係数は $k_{min} = 3.0 \times 10^{-4}$ cm/s また、等方均一な媒体としての等価透水係数は $\sqrt{k_{Max} \cdot k_{min}} = 3.8 \times 10^{-4}$ cm/s となり、その水理的異方性は $\sqrt{k_{Max} / k_{min}} = 1.269$ となる。さらに、最大透水係数となる方向は $N 35.6^\circ E$ である。

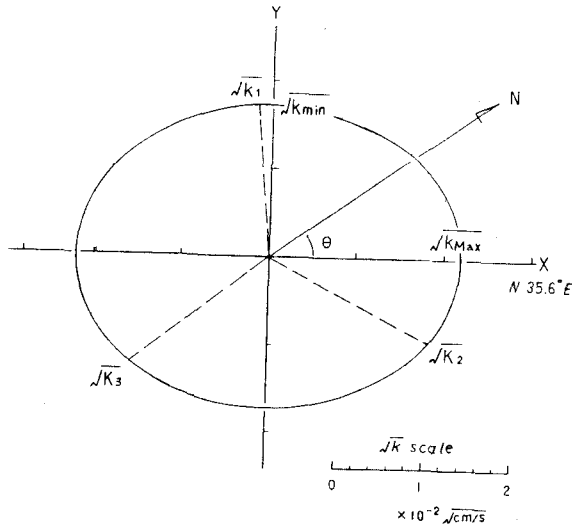


図-4 透水テンソル

4.2 透水テンソルと割れ目性状

透水テンソルと割れ目の卓越方向との関係を表-4にまとめた。同表の割れ目の性状はBTV調査結果をまとめたもので、「開口」とは1mm以上開口した割れ目、「地下水流動痕跡」とは開口割れ目の内、割れ目面に酸化鉱物などが付着し茶褐色などの変色している地下水が流動した痕跡を示している割れ目、「充填」とは割れ目内に粘土鉱物などを充填している割れ目を夫々いうこととした。なお、()内は割れ目の傾斜を示している。

表-4 透水テンソルの方向と割れ目の卓越方向

割れ目の性状			透水テンソル
開口	地下水流動痕跡	充填	
N 30° E (20° NW)	N 30° E (60° ES)	N 60° E (15° NW, SE)	N 35.6° E

透水テンソルの方向は割れ目の卓越方向の内、開口割れ目および地下水が流動した痕跡を示す割れ目の方向と良く一致する方向を示している。

4.3 等方均一等価透水係数

正弦波圧力試験の試験区間でのルジオン試験(5 m区間)結果を単純に $1 \text{ Lugeon} = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ として透水係数に換算して求め表-5にまとめた。一方、透水テンソルより求めた等方均一な媒体としての等価透水係数は、表-3に示すように $3.8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となる。

表-5 ルジオン試験結果の換算透水係数

試験孔 NO.	0 - 1	0 - 2	0 - 3	全体平均
透水係数 cm/s	4.3×10^{-4}	5.6×10^{-4}	5.2×10^{-4}	4.5×10^{-4}

ルジオン試験結果による換算透水係数と正弦波圧力試験による透水係数また換算透水係数の全体平均と透水テンソルの等価透水係数とは若干異なり、前者の方がやや大きい。しかし、ルジオン試験および透水係数への換算精度などを考慮すると比較的良く整合しているとも言える。

V 結 論

割れ目系岩盤での正弦波圧力試験の結果をもとに、岩盤の水理的異方性(透水テンソル)を求めた。岩盤の透水テンソルの方向は、割れ目の内、開口割れ目および地下水の流動が認められる割れ目の卓越方向と良く一致する結果を示した。

ルジオン試験結果による換算透水係数と正弦波圧力試験による透水係数また換算透水係数の全体平均と透水テンソルの等価透水係数とは若干異なり、前者の方がやや大きい値を示した。

正弦波圧力試験の結果は、岩盤の水理的な異方性が岩盤の割れ目の性状に依存することを明確に示唆しており、今後、岩盤の割れ目に依存した水理的な異方性に関する詳細な考察が期待できる。

参考文献

- Motojima, I., etc. (1993): Closshole permeability testing mehtod in bedrock,
SOIL AND FOUNDATIONS, VOL. 33, NO. 4, pp.108-120, Dec. 1993.