

ルジオンテストと揚水試験による花崗岩岩盤の透水性評価に関する考察

A study on permeability evaluation of Granite using Lugeon test and Pumping test

才田 進¹・濱里 学²・飯島 康夫³・神野 健二⁴

Susumu SATTA・Manabu HAMAZATO・Yasuo IJIMA・Kenji JINNO

The permeability of rock mass which is estimated usually by lugeon test is affected considerably by cracks in the rocks. There are great difference even in the adjacent area as the geological conditions. Therefore, the permeability evaluation will be doubtful if only using the mean value of the permeability.

In the present study, we discuss the methods and results of the permeability evaluation with boring investigation, lugeon test and pumping test in the area occupied by the granitic rocks as the basement. The mutual relationships were examined which include the relations between geological condition and permeability, lugeon test's statistical distribution and mean value, as well as coefficient of permeability from pumping test and lugeon test. Considering these results, we proposed the method of permeability evaluation for rock mass from pumping test's.

Key Words : lugeon test, pumping test, permeability, lognormal distribution

1. はじめに

岩盤の透水性については、割れ目（亀裂）系の影響を強く受けるため、室内透水試験で評価することが困難であり、ルジオンテストなどの原位置試験が広く利用されている。しかし、ルジオンテストなどの結果については、岩盤状況の局所的要因などによって隣接する試験区間でも透水性が数オーダー違う場合も多く、岩盤状況（風化状況、亀裂系の発達状況、充填物状況など）と試験結果の関係評価や試験結果の総合評価（透水性区分や平均透水性の評価）が課題になることが多い。

岩盤を対象とした揚水試験は、ルジオンテストに比して一般化していないが、岩盤の平均透水性の評価が直接行える点で有望な方法である。しかし、岩盤中の揚水試験結果のデータの開示例は見当たらず、揚水試験の有効性を検討することが困難な状況である。また、揚水試験における単孔式と複孔式の差異、揚水試験結果とルジオンテスト結果の関係など興味深い研究課題ではあるが、検討事例は無いようである。

そこで本研究では、花崗岩岩盤を対象に、ボーリングによる地質調査結果とルジオンテスト結果および単孔式と複孔式の揚水試験結果の比較を行い、岩盤透水性の評価に関する検討を行った。その結果、地質状況と透水性の関係、ルジオンテスト結果の統計的な分布特性と平均値の関係、揚水試験時の揚水孔水位と観測孔水位の水位差に応じた単孔式と複孔式による透水係数の関係、および揚水試験結果とルジオンテストの透水係数の関係など、幾つかの興味ある知見が得られたので報告するものである。

キーワード：岩盤、ルジオンテスト、揚水試験、透水性、対数正規分布

¹正会員 工修 八千代エンジニアリング株式会社 総合事業本部 河川部 部長

² 八千代エンジニアリング株式会社 技術推進本部 開発企画部 主任

³ 八千代エンジニアリング株式会社 九州支店 技術第3部 副部長

⁴正会員 工博 九州大学大学院 工学研究院 教授

2. 地質概要と調査試験内容

調査地域は、福岡平野南東部の三郡山に源を発する二級河川C川の上流域で、花崗岩が広く分布する地域である。調査地域の基盤岩は、山地部を構成する中生代の花崗岩類と、台地・丘陵地の基盤岩を構成する古第三紀堆積岩類からなる。当該地域に分布する花崗岩類は、早良型花崗岩類に属し、一般にカリ長石に富み粗粒であるため、風化に対する耐性が弱く、地表より深さ数10mまでマサ化している箇所もある。

岩盤の風化区分は、表-1に示すようにダム調査における岩盤風化区分を参考にして作成した。花崗岩山地においては、谷部の小起伏面の形状が、地下岩盤の風化や亀裂発達状況と関連性を有する¹⁾ことが知られている。本調査地域では、地質踏査により低山地部と山麓の急峻部で岩盤の風化深度が異なり、低山地部ほど風化深度が深くなることが分かった。このような風化状況の変化は、図-1および図-2に示すように西側の第四紀層が分布する平地部から東側の花崗岩山地部に向かって帯状のゾーンとして区分される。この帯状ゾーンを山地部から平野部に向けて地層ブロックⅠ～Ⅳと呼ぶことにする。地層ブロックⅠは風化区分の $\gamma \sim \beta$ 級岩盤ないし γ 級岩盤を主体とし、ブロックⅡは γ 級岩盤を、ブロックⅢは δ 級岩盤を主体とする。

主な調査試験の内容を表-2に、調査位置を図-2に示す。調査位置は、C川が尾根部から平野部に出る地点である。花崗岩岩盤の水理地質特性を調べるために、左岸にH13P-2とP-3を右岸にH13P-1とH14P-4を配置した。また、岩盤の透水性の統計分析精度を向上させるため、既往調査のAダム（地層ブロックⅠ）およびB地下ダム地点（地層ブロックⅢ）のデータも利用した。ルジオンテストは、岩盤の透水性が亀裂の開口性や挟在物の影響を受け易いため、上昇圧力刻みを $\Delta P = 0.02 \text{ MPa}$ (0.2 kgf/cm^2)と小さくして、限界圧力以下の低圧部の注入圧力と注入量の関係を精度良く把握することにした。透水係数は、P～Q曲線における限界圧力以下の各注入圧力における透水係数²⁾を計算し、その平均値をもって当該試験区間の平均透水係数として求めた。

揚水試験については、H13P-1では水位観測孔として、川側方向（南方向）に観測孔1を下流方向（西方向）に観測孔2をそれぞれ10m離して設置した。H13P-3では近傍のH13P-2を水位観測孔として利用した。また、亀裂沿いに地下水の影響範囲が大きくなる可能性があることから、水位が十分に平衡状態になることを確認するため、揚水時間を70～100時間（3～4日）程度と長くした。

表-1 花崗岩岩盤の風化区分

風化区分	ダムの風化区分	性 状
マサ状	ϵ	構成鉱物は全て分離し、土砂状になる。著しい場合は、長石・雲母の粘土化が進み赤土状となる。
強風化	δ	構成鉱物の分離が進み、ハンマーのピックが突き刺さるが、岩盤としての強度は保持している。
中風化	γ	風化は主に亀裂沿いに進んでいるが、岩芯には未風化部が多く残る。
新鮮 (～極新鮮)	$\beta \sim \alpha$	風化は一部の亀裂沿いに小範囲で認められるのみで、全体に未風化、堅硬な岩盤である。(αは肉眼では風化がほとんど識別できない極新鮮状態。本調査域では、ボーリングコアのみで確認できる)

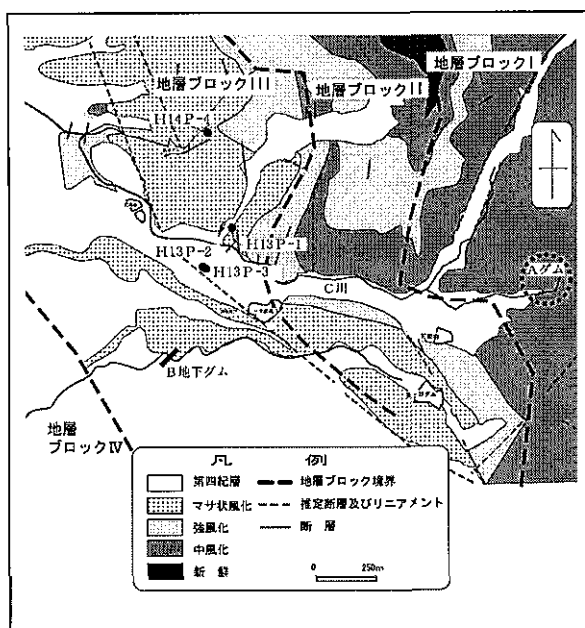


図-1 風化区分図

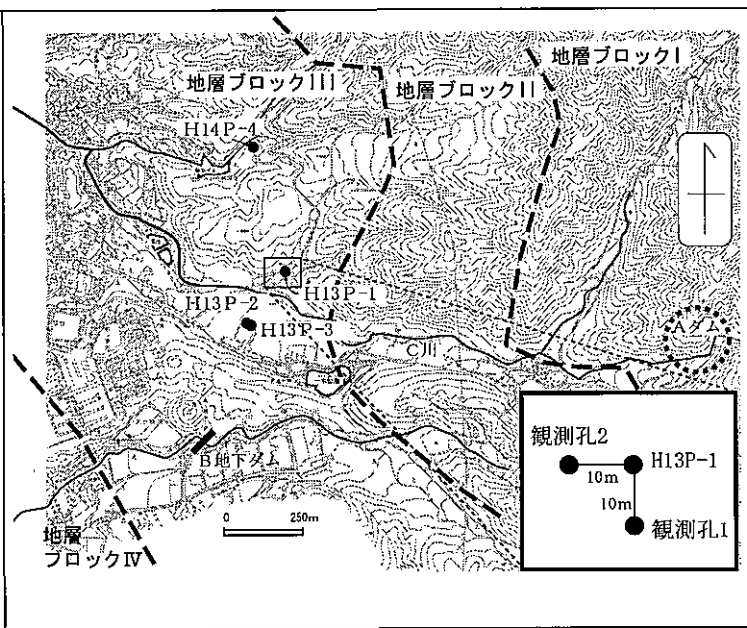


図-2 調査位置周辺地形と調査試験位置図

3. ルジオンテストによる岩盤の透水性評価

(1) 岩盤性状とルジオンテストの透水係数の関係

今回の調査ボーリングで取得したRQD、電気検層による比抵抗値および亀裂情報等の岩盤性状とルジオンテストの透水性の関係を検討する。これらの指標と透水係数の関係を図-3に示す。RQDと透水係数の相関は認められない。比抵抗値が透水性評価に有効であるとの見解もあるが、これらの図より、相関性は低いことがわかる。また、開口亀裂と透水係数の関係は、開口亀裂の密度や幅が大きくなれば透水係数が大きくなる傾向は認められるものの、明瞭な相関性はないようである。

岩盤の透水係数は、亀裂の発達状況（亀裂規模、開口度、連続性）、亀裂充填物、岩盤等級（風化度）などに関係するため、ボーリング調査だけでは、岩盤内部の亀裂の連続性や充填物の状況までは把握できない。このため、岩盤性状と透水係数の相関性は図-3のように低い結果になるものと考えられることから、岩盤の透水性を評価、推定する場合には、ルジオンテストなどの原位置試験が不可欠である。

表-2 調査試験項目と試験概要

調査試験項目	内 容
ボーリング調査	・ H13P-1 : L=150m, 0~82m : ϕ 150mm, 82~150m : ϕ 86mm - 観測孔1 : H13P-1から南方向10.0m, L=50m, ϕ 66mm - 観測孔2 : H13P-1から西方向10.0m, L=50m, ϕ 66mm ・ H13P-2 : L=120m, ϕ 150mm ・ H13P-3 : L=150m, ϕ 150~165mm ・ H14P-4 : L=100m, ϕ 66mm H13P-2とH13P-3間の距離 : 10.0m
ボアホール スキャナ観測	観測機器 : BS-M (株) コア製 亀裂の分布, 開口性, 挟在物等の状況を観測。
電気検層	亀裂の開口性を把握するため, 電極間隔を25, 50, 100cmの3ケースで実施。
ルジオンテスト	試験区間長は10mを基本として, シングルパッカーによるステージ法を採用。透水係数の算出を目的として, 限界圧以下の低圧部を精度良く測定。
揚水試験	揚水孔 : H13P-1, H13P-2, P-3, H14P-4 段階揚水試験および長時間 (約70~100時間) 連続揚水試験を実施。なお, H14P-4は口径の関係で低揚水量による揚水試験を実施。

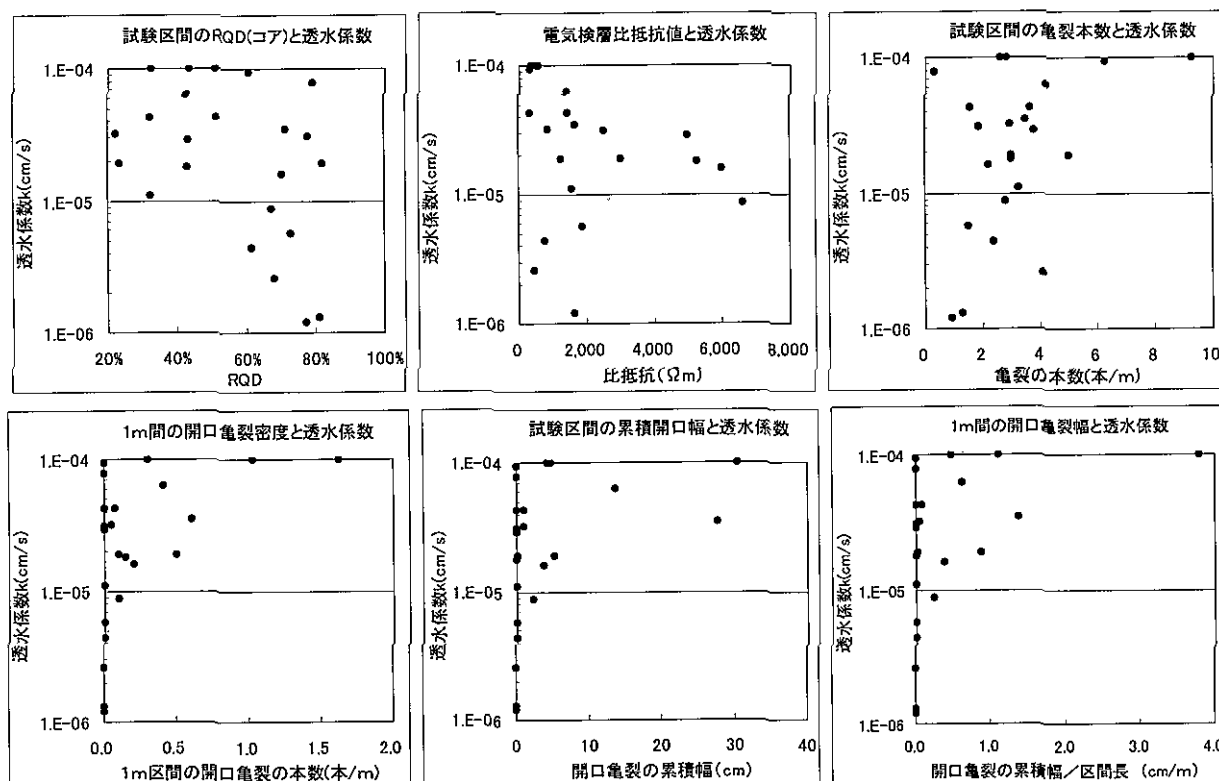


図-3 岩盤性状と透水係数の関係

表-3 透水性ランク一覧表（透水係数は指数タイプで表示）

透水性ランク	1	2	3	4	5	6	7
透水係数(cm/s)	1.0E-08～	3.2E-08～	1.0E-07～	3.2E-07～	1.0E-06～	3.2E-06～	1.0E-05～
透水性ランク	8	9	10	11	12	13	14
透水係数(cm/s)	3.2E-05～	1.0E-04～	3.2E-04～	1.0E-03～	3.2E-03～	1.0E-02～	3.2E-02～

(2) 岩盤の風化度と透水係数の分布特性の関係

前項の検討結果より、本項では岩盤の透水性を直接ルジオンテストの透水係数から評価する。統計分析精度を向上させるにはデータ数を増やす必要があるため、今回の調査ボーリング孔の近傍に位置するAダムボーリング孔、B地下ダムボーリング孔を含め、透水係数の分布特性を吟味し、最終的に調査ボーリング孔の透水係数の分布特性を評価する。

透水係数については、対数正規分布すると言われており³⁾、ルジオンテスト結果の対数平均値（相乗平均値）を岩盤の平均透水係数とした地下水解析によって高精度に岩盤地下水流動を再現した研究も報告されている⁴⁾。同報告では透水係数の統計的分布特性は示されていないが、対数平均値を平均透水係数とみなす考え方は透水係数の対数正規分布を仮定したものと言える。

ここでは、既往の研究を参考に、透水係数の対数正規分布性を仮定して、透水性ランクを表-3のように設定した上で、調査ボーリング孔、Aダムボーリング孔、B地下ダムボーリング孔のそれぞれのルジオンテスト結果を、風化区分別と風化区分なしの2通りで整理し、透水性ランクと試験区間長（累計値）のヒストグラムを図-4に示す。なお、ヒストグラムは本来、発生度数で表すが、ルジオンテストではテストステージごとに試験区間長が異なるものもあるため、区間長の累計値を用いることにした。

図-4によると、「調査ボーリング孔の新鮮岩」、「Aダムボーリング孔の新鮮岩」、「B地下ダムボーリング孔の強風化と風化区分なし」が比較的对数正規分布に近いと見なされるが、調査ボーリング孔やAダムの強風化や中風化はバラツキが大きく、対数正規性は認められないようである。対数正規性が低いものは、区間長の累計値が小さく、風化度が強いものが多いため、全ボーリング孔のデータを合計し、強風化と中風化を同一区分にすることとし、全ボーリング孔の「表土（堆積物+マサ）」、「強風化+中風化岩」、「新鮮岩」および「風化区分なし」でヒストグラムを作成して、図-4の右端に示した。その結果、全ボーリング孔の透水係数には、対数正規性の向上がみられ、データ数の増大と「強風化と中風化の同一区分化」が透水性の分布特性に影響したものと言える。

以上の分析の結果を受けて、調査ボーリング孔の透水係数の分布特性と平均透水係数を評価するために、図-5に示すように「強風化+中風化岩」と「新鮮岩」に分けて統計的に対数正規分布を当てはめてみた。また、透水係数の対数平均値も併せて示した。この結果、「新鮮岩」については工学的に十分対数正規性を有していることが認められ、対数平均値を「新鮮岩」の平均透水係数と見なし得るものと判断できた。一方、「強風化+中風化岩」の対数正規性はそれほど高くないが、平均透水係数は、最頻値と対数平均値がほぼ一致することから、対数平均値を用いることは合理的と考えられる。

4. 揚水試験とルジオンテストによる岩盤の透水性評価

(1) 連続揚水試験における単孔式と複孔式の透水性評価結果の関係

ルジオンテストを実施した調査ボーリング孔を用いて、連続揚水試験を行った。連続揚水試験結果の試験条件の概要と水理特性の算出結果を一覧表形式で表-4に示す。水理特性（透水量係数と貯留係数）はタイス、ヤコブ、回復法および平衡法で求め、透水係数は透水量係数を表中の帯水層厚で除して算出している。

また、例えば「試験名①P-1」の揚水孔はH13p-1（以降H13等を省略してP-1孔等と称す）で、観測孔は観測孔1と観測孔2であり、観測孔を無視した単孔式として算出した水理特性、複孔式として観測孔1を観測孔とした水理特性、観測孔2を観測孔とした水理特性を3段に記載している。他の試験ケースも同様の規則で一覧表に記している。

表-4の結果を概観すると、タイス、ヤコブ、回復法で算出した透水係数の差異は小さいが、揚水試験①P-1

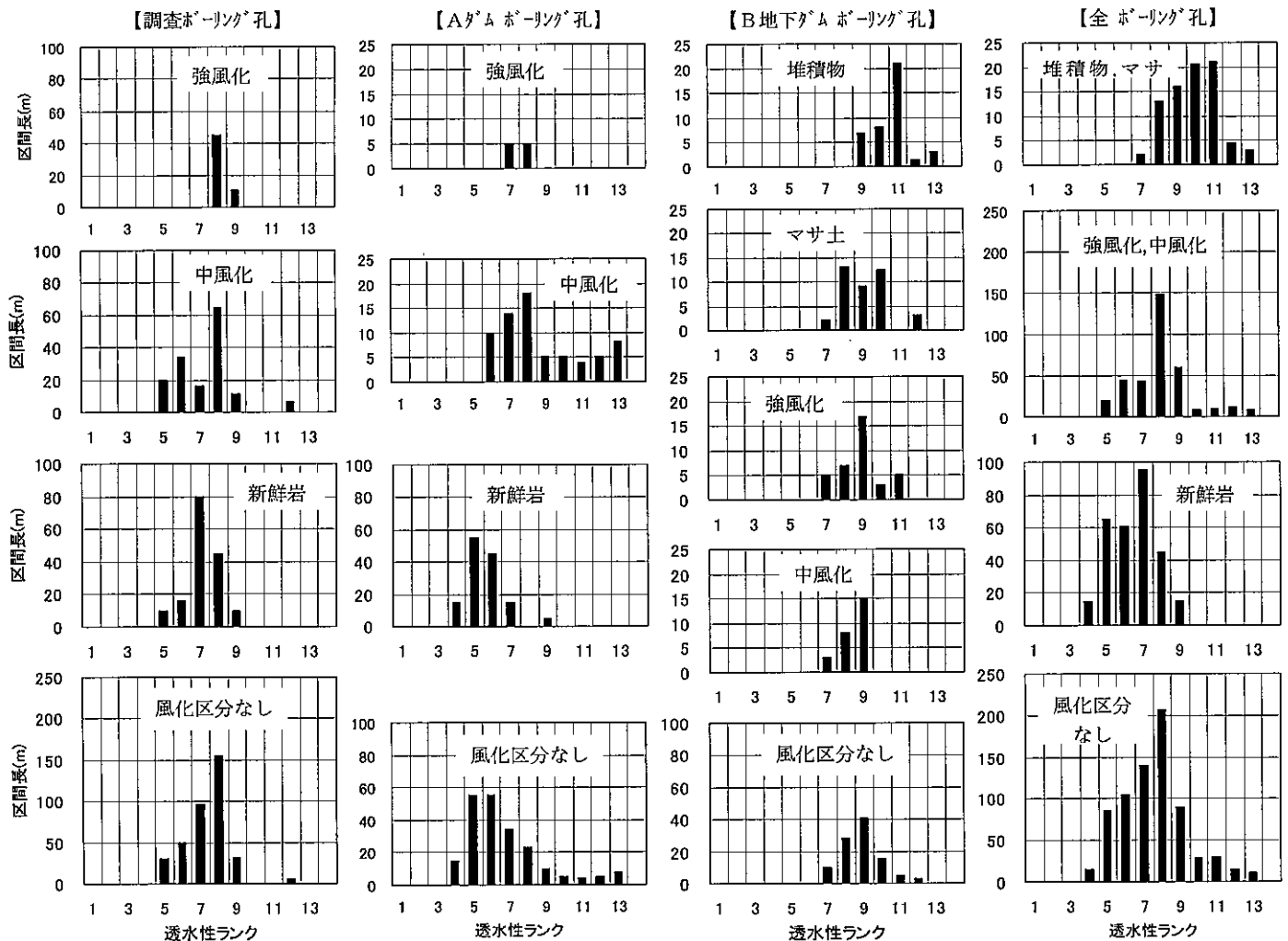


図-4 調査ボーリングと周辺既存ボーリングデータの風化度と透水性ヒストグラムの関係

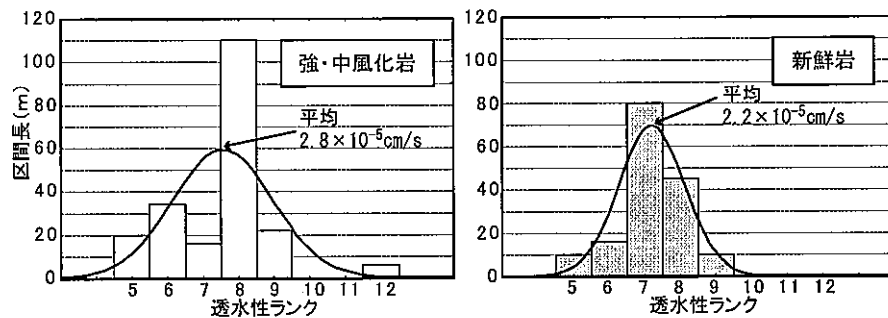


図-5 調査ボーリングの強・中風化岩と新鮮岩における透水性の対数正規分布の適合性

～③P-1 では単孔式と複孔式の透水係数の差異が大きく、⑤P-3～⑦P-3 では単孔式と複孔式の透水係数の差異が小さいことが特徴的である。この原因を検討するため、揚水試験③P-1 と⑦P-3 の連続揚水試験時の揚水孔と観測孔の水位低下状況を図-6 に示す。P-1 では揚水孔の水位低下量に対して観測孔の水位低下量が小さいが、P-3 では観測孔の水位低下量が大きいために大きく相違し、この揚水孔と観測孔間の水位低下量の比が単孔式と複孔式の透水係数の差異の大小に関係していると考えられる。そこで、揚水孔の水位低下量を H_1 、観測孔の水位低下量を H_2 とし、揚水開始一日後の H_2/H_1 に着目して、表-4 を表-5 のように整理した。同表では、単孔式と複孔式の透水係数はタイスの方法の算出結果で代表し、揚水試験に対応する区間におけるルジオンテストによる透水係数の対数平均値を併せて示した。なお、⑥P-3 では、対応するルジオンテストの結果はないが、揚水試験結果から同等の透水性を有するとみなし、P-2 孔のルジオンテストの対数平均値を参考値として括弧内に示した。①P-1～③P-1 では近接した観測孔 1,2 の透水係数も加えた対数平均値も括弧内に示した。また、表-4 に示した水理パラメータを式(1a)に示すタイス法の水位低下量計算式⁹⁾に適用して、

揚水開始一日後の揚水試験③P-1 と⑦P-3 の水面形を計算した結果を図-7 に示す。

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1a)$$

$$\text{ただし, } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (1b)$$

ここで、 s : t 時間揚水したときの水位低下量、 Q : 揚水量、 r : 揚水井中心からの距離、 t : 揚水時間、 T : 透水量係数 ($T = k \cdot H$)、 $W(u)$: Wenzel の井戸関数、 k : 透水係数、 H : 揚水前の地下水深、 S : 貯留係数である。

図-7 より、③P-1 では、複孔式は揚水孔近傍の計算水位が実際の揚水孔水位に比べて非常に高くなっていること、単孔式の計算水位は揚水孔近傍では揚水孔水位より低く、観測孔位置では観測孔水位より高くなっている。これに対し、⑦P-3 では③P-1 に比べて単孔式と複孔式による計算水位の差異が小さくなっていることがわかる。すなわち、 H_2/H_1 が小さい③P-1 の場合は単孔式では水面勾配を過大評価するため、透水係数を過小評価し、複孔式では水面勾配を過小評価するため、透水係数を過大評価するものと推測される。一方、 H_2/H_1 が比較的大きい⑦P-3 の場合は、単孔式では水面勾配をやや過大評価し、複孔式では水面勾配をやや過小評価する程度であるため、単孔式と複孔式の透水係数の差異が比較的小さくなったものと考えられる。

(2) 岩盤の透水性評価

前項の分析結果に基づいて、単孔式と複孔式の透水係数の差異と水位低下傾向を総合的に検討し、揚水試験による岩盤透水係数の推定結果と対応するルジオンテストの対数平均値を表-6 にまとめた。表中の揚水試験による岩盤透水係数の推定理由①～③については、以下にまとめた。

- ① P-1 については、揚水孔の水位低下量に比べて観測孔の低下量が小さい ($H_2/H_1 \approx 0.07$)。単孔式と複孔式の透水係数の差異が大きいが、単孔式は水面勾配を過大評価し、複孔式は水面勾配を過小評価していることに起因している。その結果、単孔式は透水性を過小評価し、複孔式は過大評価している可能性がある。したがって、信頼できる透水係数 k の範囲はかなり幅があり、「単孔式 $< k <$ 複孔式」と推定される。
- ② P-3 については、揚水量は P-1 と同規模であるが、揚水孔の水位低下量に応じて、観測孔の低下量も比較的大きくなる ($H_2/H_1 \approx 0.3$)。単孔式と複孔式の水面形の差異も比較的小さく、透水係数が比較的近い。

表-4 連続揚水試験による水理パラメータ算出結果一覧 (シェード部は単孔式、他は複孔式として算出)

試験名	揚水孔	観測孔	口径 (mm)	揚水量 (L/分)	リット 区間 (m)	帯水層厚 D(m)	T=透水量係数 (m ² /s)			k=透水係数 (cm/s) (=T/D×100)			貯留係数 (-)		
							タイス	ヤコブ	回復法	平衡法	タイス	ヤコブ	回復法	タイス	ヤコブ
①P-1 2001.09	P-1孔	—	150	60.0	20~82	78.00	8.15E-06	1.22E-05	1.01E-05	—	1.04E-05	1.56E-05	1.29E-05	2.43E-02	8.23E-03
		観測孔1				78.00	1.78E-04	1.90E-04	9.42E-05	3.13E-05	2.28E-04	2.44E-04	1.21E-04	7.12E-07	5.46E-07
		観測孔2				78.00	1.43E-04	1.67E-04	6.81E-05	3.08E-05	1.83E-04	2.14E-04	8.73E-05	3.44E-05	2.82E-05
②P-1 2002.01	P-1孔	—	150	60.0	20~82	78.30	1.00E-05	1.05E-05	1.35E-05	—	1.28E-05	1.34E-05	1.72E-05	1.15E-01	1.00E-02
		観測孔1				78.30	1.41E-04	算出できず	8.73E-05	3.15E-05	1.80E-04	算出できず	1.11E-04	2.69E-07	算出できず
		観測孔2				78.30	1.90E-04	2.12E-04	8.94E-05	2.94E-05	2.43E-04	2.71E-04	1.14E-04	4.40E-05	3.13E-05
③P-1	P-1孔	—	150	100.0	20~150	144.88	1.52E-05	2.03E-05	1.18E-05	—	1.05E-05	1.40E-05	8.14E-06	1.13E-01	5.69E-05
		観測孔1				144.88	1.75E-04	2.77E-04	6.74E-05	1.99E-05	1.21E-04	1.91E-04	4.65E-05	4.09E-04	1.44E-05
		観測孔2				144.88	2.97E-04	5.01E-04	1.58E-04	1.97E-05	2.05E-04	3.46E-04	1.09E-04	1.19E-06	2.39E-06
④P-2	P-2孔	—	150	80.0	26~120	104.95	1.81E-05	1.53E-05	1.59E-05	—	1.72E-05	1.46E-05	1.52E-05	1.60E-03	2.75E-03
	P-2孔	—	150	100.0	26~120	104.65	1.77E-05	1.24E-05	8.65E-06	—	1.69E-05	1.18E-05	8.27E-06	1.49E-03	5.33E-06
⑤P-3	P-3孔	—	165	35.0	25~80	67.12	1.40E-05	9.65E-06	1.43E-05	—	2.09E-05	1.44E-05	2.13E-05	2.06E-03	5.73E-03
	P-2孔					67.12	1.82E-05	2.85E-05	2.75E-05	6.45E-05	2.71E-05	4.25E-05	4.10E-05	3.17E-06	1.70E-06
⑥P-3	P-3孔	—	150	94.0	80~150	135.37	1.94E-05	2.09E-05	8.29E-06	—	1.43E-05	1.54E-05	6.12E-06	8.20E-04	5.70E-04
	P-2孔					135.37	4.88E-05	2.93E-05	1.60E-05	4.43E-05	3.60E-05	2.16E-05	1.18E-05	8.51E-06	1.00E-03
⑦P-3	P-3孔	—	165	105.0	25~150	135.97	1.99E-05	2.29E-05	1.48E-05	—	1.46E-05	1.68E-05	1.09E-05	2.46E-03	7.58E-04
	P-2孔					135.97	5.80E-05	4.92E-05	3.27E-05	3.36E-05	4.27E-05	3.62E-05	2.40E-05	5.10E-07	1.19E-06
⑧P-4	P-4孔	—	86	15.0	14~100	96.99	2.15E-05	1.70E-05	—	—	2.22E-05	1.75E-05	—	5.11E-03	7.56E-03
	P-4孔	—	86	19.0	14~100	96.19	3.30E-05	1.65E-05	—	—	3.43E-05	1.72E-05	—	1.11E-03	8.18E-03
	P-4孔	—	86	24.0	14~100	96.10	1.87E-05	1.39E-05	1.22E-05	—	1.95E-05	1.45E-05	1.27E-05	4.81E-04	7.61E-03
⑨P-4	P-4孔	—	86	9.5	18~100	97.20	4.98E-05	2.71E-05	1.50E-04	—	5.12E-05	2.79E-05	1.54E-04	2.89E-04	3.07E-03
	P-4孔	—	86	14.0	18~100	97.15	3.44E-05	2.31E-05	6.15E-05	—	3.54E-05	2.38E-05	6.33E-05	1.12E-03	3.13E-03
	P-4孔	—	86	18.5	18~100	97.16	3.53E-05	1.07E-05	4.42E-05	—	3.63E-05	1.10E-05	4.55E-05	5.01E-04	5.86E-03
	P-4孔	—	86	23.0	18~100	97.02	2.49E-05	1.83E-05	2.03E-05	—	2.57E-05	1.89E-05	2.09E-05	8.00E-04	3.60E-03

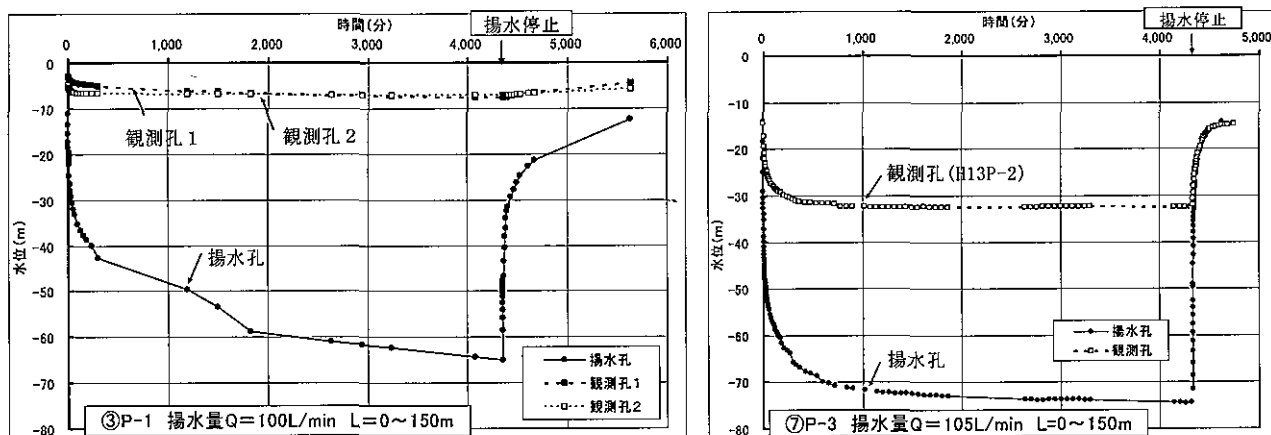


図-6 ③P-1, ⑦P-3 における連続揚水試験時の水位低下状況

表-5 連続揚水試験結果総括表 (単孔式・複孔式はタイスの方法, ルジオンテストは対象区間の対数平均値)

揚水試験	区間 深度m	揚水量 L/min	一日水位低下量(m)			揚水試験:透水係数(cm/s)			ルジオンテスト 透水係数(cm/s)
			揚水孔 H1	観測孔 H2	H2/H1	単孔式	複孔式	平衡式	
①P-1	0~82	60.0	45.8	3.2	0.07	1.0E-05	2.3E-04	3.1E-05	8.3E-05 (4.4E-05*)
②P-1	0~82	60.0	55.1	4.5	0.08	1.3E-05	1.8E-04	3.2E-05	*:観測孔1,2含む
③P-1	0~150	100.0	48.4	3.6	0.07	1.1E-05	1.2E-04	2.0E-05	5.1E-05 (3.9E-05*)
④P-2	0~120	80.0	52.5	—	—	1.7E-05	—	—	2.3E-05
		100.0	69.5	—	—	1.7E-05	—	—	
⑤P-3	0~80	35.0	24.0	8.2	0.34	2.1E-05	2.7E-05	6.5E-05	(P-2 と同等:2.3E-05)
⑥P-3	80~150	94.0	57.3	18.4	0.32	1.4E-05	3.6E-05	4.4E-05	
⑦P-3	0~150	105.0	58.5	18.2	0.31	1.5E-05	4.3E-05	3.3E-05	
⑧P-4	0~100	15.0	(3.9)	—	—	2.2E-05	—	—	9.5E-06
		19.0	(5.1)	—	—	3.4E-05	—	—	
		24.0	(7.8)	—	—	2.0E-05	—	—	
⑨P-4	0~100	9.5.0	(2.1)	—	—	5.1E-05	—	—	9.5E-06
		14.0	(3.5)	—	—	3.5E-05	—	—	
		18.5	(5.0)	—	—	3.6E-05	—	—	
		23.0	(7.1)	—	—	2.6E-05	—	—	

注) 1. ①P-1~③P-1の観測孔は観測孔-1。揚水孔の水位低下量の()内値は17分後の水位低下量

2. 透水係数は指数タイプで表示

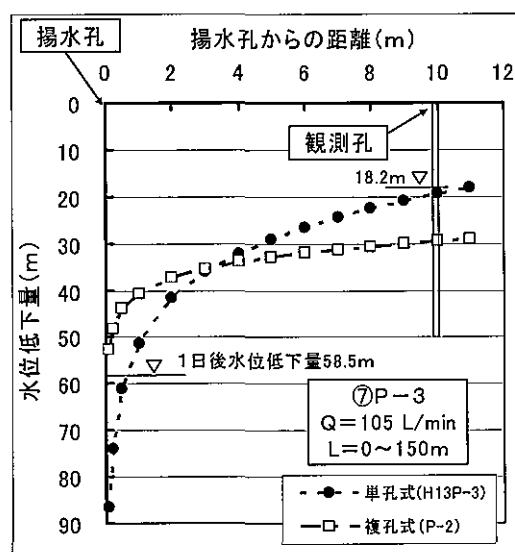
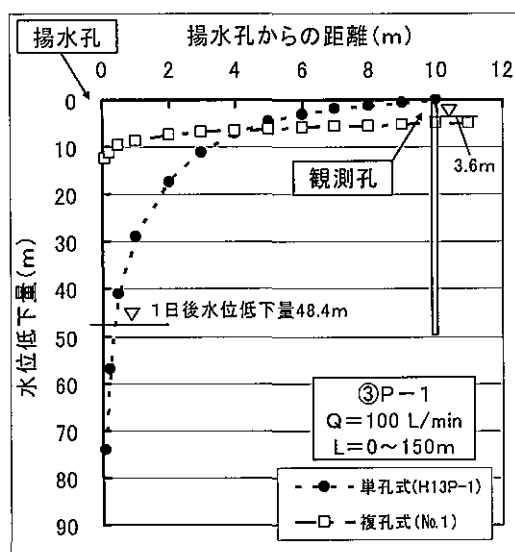


図-7 ③P-1, ⑦P-3 における連続揚水試験開始一日後の単孔式と複孔式による計算水位分布

したがって、信頼できる透水係数 k の範囲はかなり狭く、「単孔式 $\leq k \leq$ 複孔式」と推定される。

- ③ P-2 については、観測孔水位は無いが、P-3 の単孔式の揚水試験結果と同等であることから、水位の低下量も同様に比較的大きいと想定される。したがって、透水係数 k の範囲は「単孔式 $\leq k$ 」と推定される。

以上のように、揚水試験による透水係数の推定結果を示したが、その推定範囲にルジオンテスト結果の対数平均値が位置することがわかる。このことから、岩盤としての透水性を推定する際には、揚水孔と観測孔の水位低下特性を考慮して、透水係数の信頼性を吟味することが重要である。

表-6 連続揚水試験結果から想定される透水係数の範囲（透水係数は指数タイプで表示）

揚水試験	区間深度 (m)	H2/H1	理由	揚水試験による K (cm/s) の推定	ルジオンテストの透水係数 (cm/s)
①②P-1	0～82	0.07, 0.08	①	$1.3E-05 < K < 1.8E-04$	$8.3E-05$ ($4.4E-05$)
③P-1	0～150	0.07	①	$1.1E-05 < K < 1.2E-04$	$5.1E-05$ ($3.9E-05$)
④P-2	0～120	—	③	$1.7E-05 \leq K$	$2.3E-05$
⑤P-3	0～80	0.34	②	$2.1E-05 \leq K \leq 2.7E-05$	(P-2 と同等: $2.3E-05$)
⑥P-3	80～150	0.32	②	$1.4E-05 \leq K \leq 3.6E-05$	—
⑦P-3	0～150	0.31	②	$1.5E-05 \leq K \leq 4.3E-05$	—

5. おわりに

本研究では、風化区分を考慮したルジオンテスト結果の統計分布や岩盤の平均透水性を検討した。また、調査ボーリング孔を用いた単孔式と複孔式の揚水試験結果から両方式の差異と原因を分析すると共に、ルジオンテストの透水係数との関係を検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 調査ボーリング孔に周辺の既存ボーリング孔のルジオンテストの結果を加えた結果、データ数が十分多く、岩盤の風化区分を適切に設定すれば、岩盤の透水係数は工学的に対数正規分布と見なしうることを示した。また、調査ボーリングの透水係数を対数正規分布に置き換えた結果、「新鮮岩」が対数正規性が強く、透水係数の対数平均値が新鮮岩の平均透水係数を示すものと評価された。これに対し、「強風化+中風化岩」は明瞭な対数正規性は認められなかったが、最頻値と対数平均値はよく合致しており、対数平均値を「強風化+中風化岩」の平均透水係数と見なし得るものと推測された。
- 2) 揚水試験では、揚水孔の水位低下量 $H1$ と観測孔の水位低下量 $H2$ の比 $H2/H1$ が、単孔式と複孔式で得られる透水係数の差異に関係することを明らかにした。すなわち、単孔式では透水係数を過小評価、複孔式の場合は過大評価する可能性があるが、 $H2/H1$ が小さい場合は両方式による透水係数の差異が大きく、 $H2/H1$ が比較的大きい場合は両方式の差異が小さくなることを示した。このことから、揚水試験による透水性の評価に際しては、揚水孔と観測孔の水位低下量や水位低下特性を十分吟味して検討する必要がある。
- 3) 揚水試験から推定された透水係数は、ルジオンテストによる平均透水係数と適合性が良好である。単孔式で観測孔を設けない場合には、ルジオンテストを併用することにより推定精度の向上が可能である。

参考文献

- 1) 池田 碩：花崗岩地形の世界，pp.30～35，古今書院，1998.6
- 2) 国土開発技術研究センター：ルジオンテスト技術指針同解説，pp.26，1984
- 3) Freeze, R.A. (1975): A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media, Water Resour. Res., Vol. 11, No. 5, pp. 725-741.
- 4) 百田博宣・藤城泰行・青木健治・花村哲也：降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討，土木学会論文集 No. 379/VI-6, pp. 74-82, 1987
- 5) (財) 国土開発技術研究センター：地下水調査および観測指針（案），pp.193，1983

(2006. 10. 3 受付)