

2. 実務に役立つ花崗岩の透水係数に関する一考察

A Study on the Permeability Coefficient of Granite Useful for Practical Work

○木村隆行, 高津順, 渡辺俊一 (エイト日本技術開発)

1. はじめに

花崗岩の透水係数は, CH~DH の岩級毎に整理された図表が見当たらず, いつも実務上困っている. 今回, 新規計測データや既往データを集計し, 岩級毎の透水係数を整理したので報告する.

2. F 地区花崗岩の透水係数

海に近接する丘陵地 F 地区の井戸などのデータを用い, 図 1 のような水位ポテンシャルがあると仮定して, 井戸深度 Z と地下水位 W および W/Z (水位/深度比) の相関式(1)~(6)を設定した.

$$\text{下降流} \quad W=a(Z-c)d \quad (1)$$

$$W/Z=\{a(Z-c)d\}/Z \quad (2)$$

$$\text{側方流} \quad W=b \quad (3)$$

$$W/Z=b/Z \quad (4)$$

$$\text{上昇流} \quad W=a/(Z-c)d \quad (5)$$

$$W/Z=\{a/(Z-c)d\}/Z \quad (6)$$

ここで, W :地下水位(GL-m)

Z : 井戸深度およびボーリング深度 (GL-m)

a : 定数 $0 < a < 1$ b : 定数 (定水位に相当)

c : 定数 (初期水位に相当) d : 定数 (現地特性, $d \cong 2$)

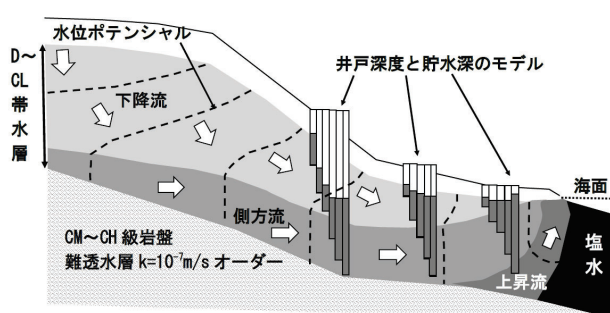


図 1. 地下水流動モデル図

この W/Z と Z の相関図を図 2~4 に示した. 図 2 は標高 9m 未満の海岸低地で, 図 3 は標高 9~25m の河川低地で, 図 4 は標高 25m 以上の丘陵部のデータになる. 海岸低地と河川低地では下降流と側方流の区分は比較的明確になったが, 丘陵部ではバラツキが大きく, 全体の傾向で区分した. この図 2~4 の相関図を利用すれば, 水位が測定できないボーリング井戸でも地下水位が想定できることになる. また, 現地ストレーナーの設置区間は, 井戸底面から水位までを帯水層厚 H と仮定した場合, 帯水層 H の半分程度であることが多く, ストレーナー長 L も推定できる.

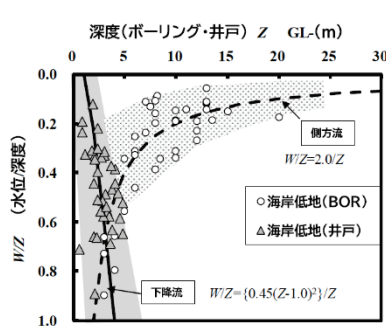


図 2. 海岸低地の相関

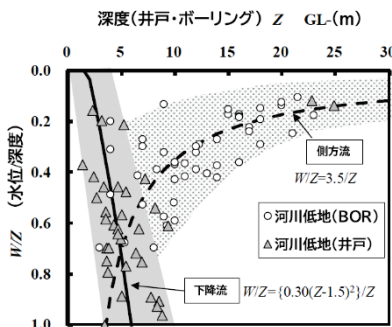


図 3. 河川低地の相関

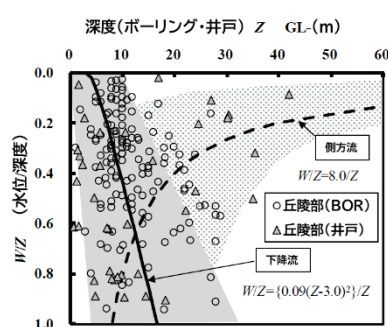


図 4. 丘陵地の相関

ここで、測定流量 q を限界揚水量と仮定し、帯水層底を井戸底と仮定すると、限界揚水量での水位低下量 s は帯水層厚 H の $1/3$ であることから¹⁾、水位低下量 s も仮定できる。井戸径 d と井戸深度 Z 、流量 q は判明しているの、ストレーナ長 L と水位低下量 s が推定でき、この仮定条件により下記のポシュレフ(Hvorslev)の式(7)、(8)で透水係数 k を推定したのが図 5 である。

図 5 での推定値と実測値はほぼ一致していることから、妥当な推定方式であると考えられる。また推定した岩級区分毎に頻度をまとめたのが図 6 である。

ボーリング井戸の場合

$$k = \frac{\ln[L/d + \{1 + (L/d)^2\}^{0.5}] q}{2\pi L s} \quad \text{式(7)}$$

掘込み井戸の場合

$$k = q / (2.75 d s) \quad \text{式(8)}$$

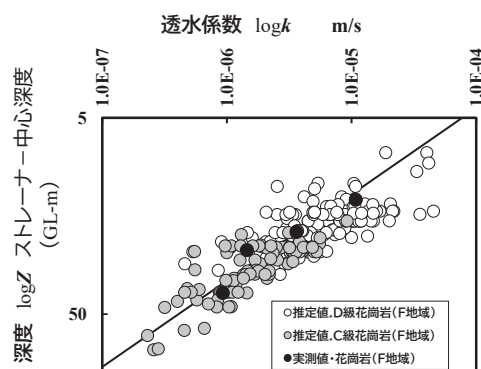


図 5. 深度 Z と透水係数の相関

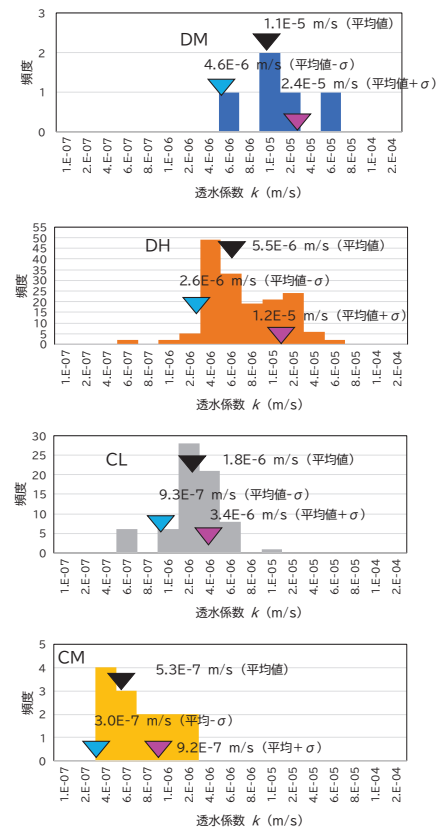


図 6. 各岩級の透水係数頻度分布図

3. 有効間隙率と透水係数

花崗岩の各岩級の間隙率 n については、本州四国連絡橋公団「風化花崗岩の支持力特性判定要領」にまとめられ、図 7 のような関係になる²⁾。ただ、その間隙率は有効間隙率 n_e でないため、山本(1983)³⁾による土質による比産出率(=有効間隙率)を参考として有効間隙率として修正したのが図 8 になる。DH 礫状、DM 砂状、DL シルト状という土質変化に対応させて設定した。その結果、不圧地下水では DM 級が最も高い有効間隙率になった。なお、ここでは不圧地下水の有効間隙率で考えるものとする。

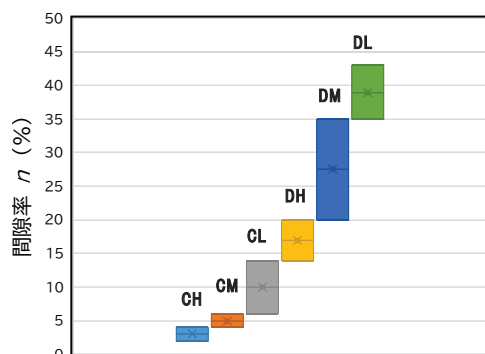


図 7. 各岩級の間隙率分布²⁾に加筆

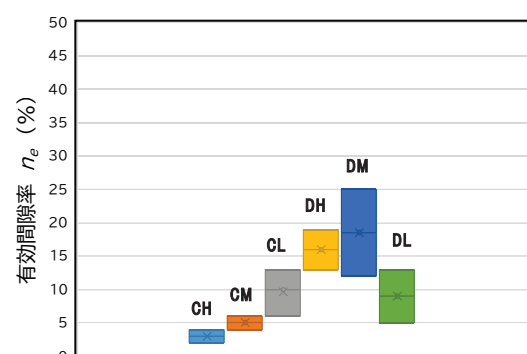


図 8. 各岩級の有効間隙率分布

澤田ら(2007)⁴⁾によると、亀裂が平行かつ等間隔に均質に分布していると仮定した場合、水理学的有効間隙率 n_e は式(9)で求めることができるとしている。その相関に当てはめると式(10)～(13)が得られる。その亀裂間隔を 20000 本/mまで微小にした場合、つまり鉱物粒子程度の 0.05 mmの間隔とした場合にデータに近似したのが式(13)になる。また、澤田ら(2007)⁴⁾によると、平行亀裂岩盤をモデルとしたトレーサー試験により、Rhén,I.ら(1997)⁵⁾の式(14)(15)を示している。また、小鯛(1984)⁶⁾は、結晶岩(crystalline rocks)の透水係数と間隙率の相関を帯状分布図で示し、その近似式は式(16)になった。渡辺(1984)⁷⁾は、微小亀裂の発達した花崗岩試料を用いて透水試験を実施し、式(17)(18)を得ている。

$$\begin{aligned} n_e &= b/e_T & (9) \\ k &= 800000n_e^3 \quad (\text{亀裂間隔 1 本/m}) & (10) \\ k &= 8000n_e^3 \quad (\text{亀裂間隔 10 本/m}) & (11) \\ k &= 80n_e^3 \quad (\text{亀裂間隔 100 本/m}) & (12) \\ k &= 0.001n_e^3 \quad (\text{亀裂間隔 20000 本/m}) & (13) \\ n_e &= 34.87k^{0.753} & (14) \\ k &= 0.0089n_e^{1.328} & (15) \\ \log k &= ((\log 100n_e - 4.87) \pm 0.51)/0.60 & (16) \\ k &= 8.45E-12(100n_e)^6 \quad (n_e < 0.05) & (17) \\ k &= 1.10E-9(100n_e)^3 \quad (n_e \geq 0.05) & (18) \end{aligned}$$

n_e : 有効間隙率, b : 亀裂の開口幅(m)
 e_T : 亀裂の平均間隔(m), 透水係数 k (m/s)

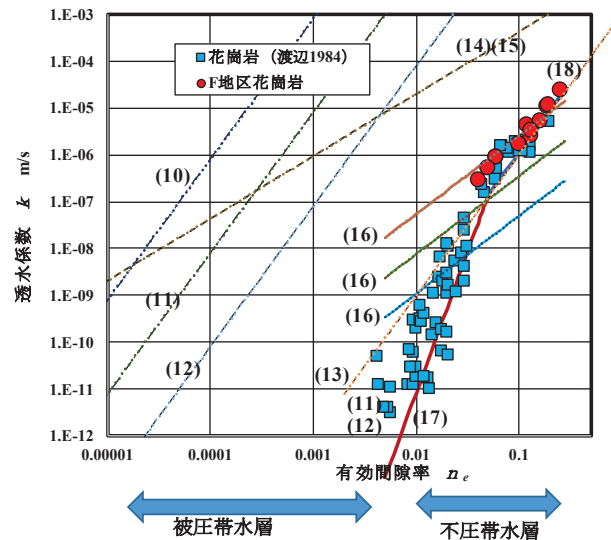


図 9. 有効間隙率と透水係数の相関

これらの式を全部示すと図 9 のようになる。また、F 地区花崗岩の透水係数を図 8 の有効間隙率に対比させた表 3 のデータと、渡辺(1984)⁷⁾の花崗岩のデータを図 9 に合わせて示した。図 9 では式(10)～(12)(14)(15)の分布が、今回の花崗岩データと異なることが分かる。山本(1983)³⁾によれば揚水試験で求められる貯留係数 S は不圧地下水では有効間隙率に等しく、被圧地下水では帯水層の圧縮率で、不圧地下水では 0.05～0.4、被圧地下水では 0.005～0.00005 になる。つまり、式(10)～(12)(14)(15)の分布は、深部の亀裂岩盤を対象とした被圧帯水層で議論されている結果と考えられ、不圧帯水層の D～CM 級花崗岩には使用できないと考えられる。

ここで渡辺(1984)⁷⁾の花崗岩と F 地区花崗岩のデータを変化点の 7%を閾値として相関式を求めたものが図 10 である。図 10 では交点となる 7.5%未満で式(19)、7.5%以上で式(20)が得られた。

$$\begin{aligned} k &= 0.1658n_e^{4.6814} \quad (n_e < 0.075) & (19) \\ k &= 0.0003n_e^{2.2415} \quad (n_e \geq 0.075) & (20) \end{aligned}$$

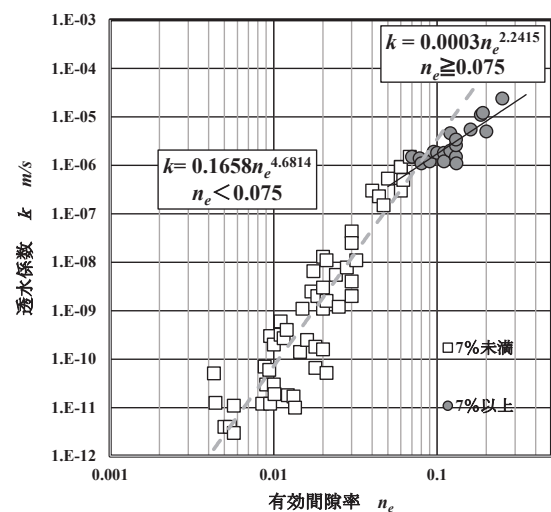


図 10. 有効間隙率と透水係数の相関

ここで、透水係数を図 8 の各岩級の有効間隙率に対応させ、式(19)(20)で推定した分布図を、図 11 および表 1、表 3 に示した。表 1 を花崗岩の各岩級における透水係数の一般値として提案する。

表 1. 花崗岩透水係数 一般値

岩級	透水係数 k (m/s)
DL	1×10^{-6} ($1 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$)
DM	7×10^{-6} ($3 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$)
DH	5×10^{-6} ($3 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$)
CL	2×10^{-6} ($3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$)
CM	1×10^{-7} ($5 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-7}$)
CH	1×10^{-8} ($2 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-8}$)

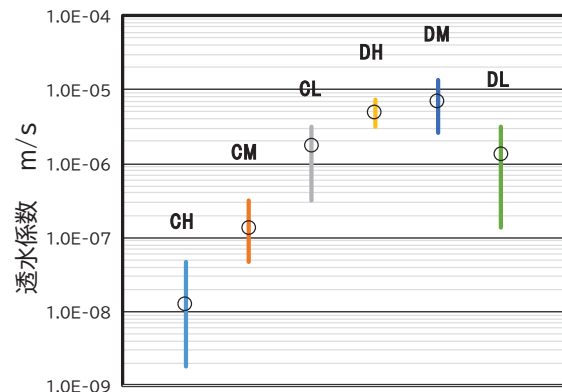


図 11. 各岩級の透水係数

4. 弾性波速度と透水係数

また、表 3 に示す孔内弾性波速度 V_{ps} (km/s)はボアホールでの地山弾性波速度であり、露頭での緩んだ状況の弾性波速度と異なり、弾性波探査で把握される速度に等しいと考えられる。ここで、その地山弾性波速度と透水係数の相関をまとめたのが図 12 である。図 12 では $V_{ps}=1.5$ km/s 程度が最も透水係数が高い状況を示している。そこで $V_{ps}=1.5$ km/s を閾値として相関式を求め、交点 $V_{ps}=1.38$ km/s を境界として得たものが式(21)(22)である。

この式(21)(22)を用いることにより、弾性波探査結果からの透水係数の設定が可能となることが考えられる。

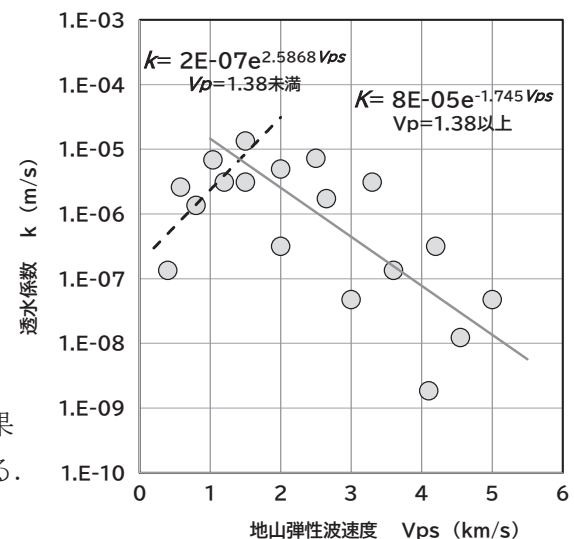


図 12. 弾性波速度と透水係数

$$k=2E-7 \text{ EXP}(2.5868 V_{ps}) \quad V_{ps}=1.38\text{km/s 未満} \quad (21)$$

$$k=8E-5 \text{ EXP}(-1.745 V_{ps}) \quad V_{ps}=1.38\text{km/s 以上} \quad (22)$$

ここで k : 透水係数(m/s) V_{ps} : 地山弾性波速度(km/s)

5. 単位体積重量と透水係数

表 3 に示す単位体積重量（湿潤密度） ρt と透水係数の相関を、図 13 にまとめた。

単位体積重量 $\rho t=2.1$ を閾値として透水係数との相関が異なると推定されたため、2.1 を閾値として相関式を確認した。その結果、 ρt が交点となる 2.136 未満と以上で式(23)(24)となった。ひとつの指標となる可能性がある。

$$k=4E-15 \text{ EXP}(10.063 \rho t) \quad \rho t=2.136 \text{ 未満 } (\times 9.8 \text{ k N/m}^3) \quad (23)$$

$$k=2E+6 \text{ EXP}(-12.25 \rho t) \quad \rho t=2.136 \text{ 以上 } (\times 9.8 \text{ k N/m}^3) \quad (24)$$

ここで k : 透水係数(m/s) ρt : 単位体積重量（湿潤密度）($\times 9.8 \text{ k N/m}^3$)

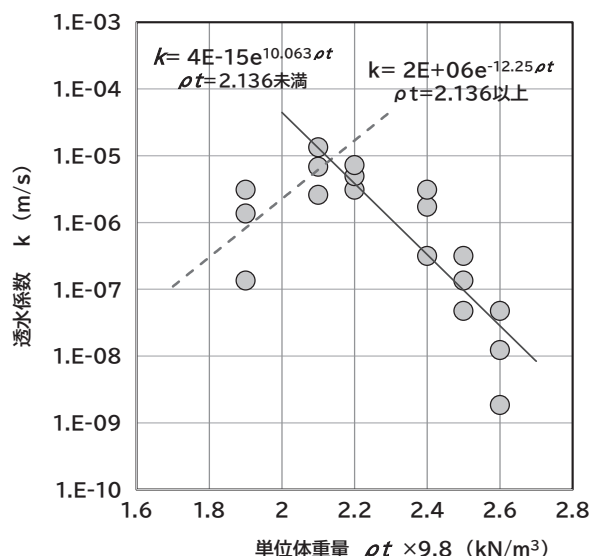


図 13. 単位体積重量と透水係数

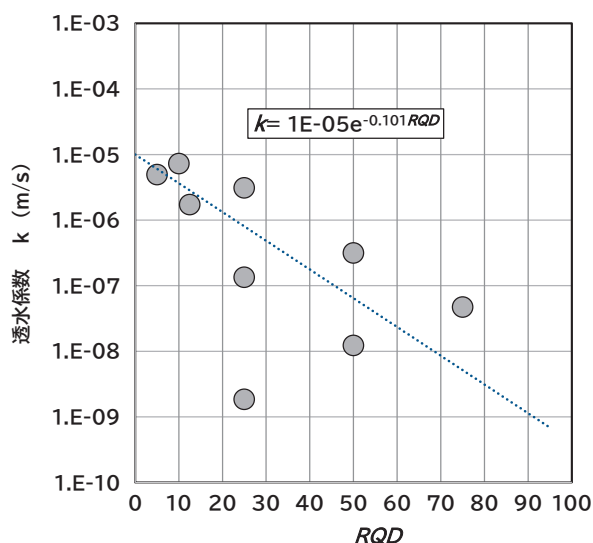


図 14. RQDと透水係数

6. RQDと透水係数

表 3 に示す RQD と透水係数の相関を、図 14 にまとめた。D 級は基本的に RQD=0 なので、DL～DH（一部）については、ほぼデータがない。また、かなりバラツキが大きいため、集約する RQD=0 の交点を $k=1E-5(m/s)$ として相関式を求めた。その結果は式(25)となる。主として C 級岩盤の目安として活用が期待できる。

$$k=1E-5 \text{ EXP}(-0.101RQD) \quad (25)$$

ここで k : 透水係数(m/s)

RQD : ボーリングコア長 1 m 中に含まれる 10cm 以上の棒状コアの長さの合計割合%

7. N値と透水係数

岩級と N 値の対応について明確な目安はないが、孔内載荷試験による変形係数と N 値の相関は多くの相関式が提案されている。代表的な相関式は地盤工学会の「地盤調査の方法と解説」⁸⁾にある式(26)であり、変形係数 E から N 値への変換式が式(27)である。もう一つは、NEXCO の「設計要領第二集」⁹⁾による式(28)であり、変形係数 E から N 値への変換式が式(29)である。

式(27)(29)を使用して各岩級の変形係数 E から N 値を算出したものを表 2 と表 3 に示した。表 2 はひとつの目安になると考える。ただ物理的風化の指標であり鉱物学的風化の指標ではないことは留意する必要がある。また、式(27)(29)を用いて算出した N 値と透水係数 $k(m/s)$ の相関図を図 15 に示した。N=90 を閾値の相関式を求めたのが式(30)(31)で、交点の N=69 未満と以上で相関が異なる。

$$E=670N^{0.986} \quad (26) \quad N=0.0014N^{1.0142} \quad (27)$$

$$E=27.1N^{0.69} \times 98.1 \quad (28) \quad N=0.00001E^{1.4493} \quad (29)$$

$$k=4E-8N^{1.1863} \quad N=69 \text{ 未満} \quad (30) \quad k=0.0001N^{-0.664} \quad N=69 \text{ 以上} \quad (31)$$

ここで E : 変形係数 (孔内載荷試験による)(kN/m²) N : 標準貫入試験 (30 cm換算 N 値)

k : 透水係数 (m/s)

表 2. 岩級と N 値

岩級	N 値
DL	30未満
DM	30以上 125未満
DH	125以上 300未満
CL	300以上 (バウンド)

8. 各種指標と透水係数

前述で検討した各種の指標と透水係数について

表 3 にとりまとめた。

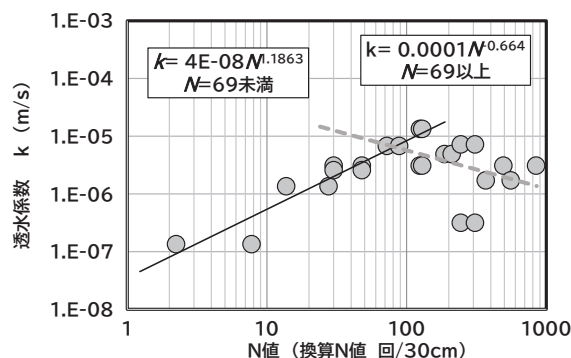


図 15. N 値と透水係数の相関

表 3. 花崗岩の各種指標と透水係数の一覧表

岩級	範囲区分	孔内横方向変形係数 Esb 98kPa	コア形状	RQD %	孔内弾性波速度 Vps km/s	露頭弾性波速度 Vp km/s	間隙率 n %	有効間隙率 ne %	密度 ρt 9.8kN/m³	一軸圧縮強度 qu 98kPa	粘着力 c 98kPa	粘着力 NEXCO 式 C kPa	粘着力代表値 C kPa	内部摩擦角 φ°	内部摩擦角 NEXCO 式 φ°	内部摩擦角代表値 φ°	F 地区花崗岩 透水係数 k (m/s)	式 (19)(20) 透水係数 k (m/s)	透水係数一般値 k (m/s)	地盤工学会の相関式 N (回)	NEXCO の第二集相関式 N (回)	目安としての N 値 N (回)
DL	min	50	シルト～砂状	0	0.4	0.4	35	5	1.9	0	0	20	20	31	31			1.3E-07		8	2	30未満
	max	300		0	1.2	0.9	43	13	1.9	250	10	46	46	37	37			3.1E-06	1E-06	48	30	
	ave	175		0	0.8	0.65	39	9	1.9	125	5	36	36	35	35			1.4E-06		28	14	
DM	min	300	砂状	0	0.58	0.58	20	12	2.1	0	0	46	46	37	37		4.6E-06	2.6E-06		48	30	30以上 125未満
	max	800		0	1.5	1.08	35	25	2.1	250	10	74	74	40	40		2.4E-05	1.3E-05	7E-06	129	124	
	ave	550		0	1.04	0.83	28	19	2.1	125	5	62	62	39	39		1.1E-05	6.8E-06		88	72	
DH	min	800	礫状	0	1.5	0.75	14	13	2.2	0	0	74	74	30	40	40	2.6E-06	3.1E-06		129	124	125以上 300未満
	max	1500		10	2.5	1.25	20	19	2.2	250	10	99	99	30	42	42	1.2E-05	7.3E-06	5E-06	244	308	
	ave	1150		5	2	1	17	16	2.2	125	5	87	87	30	41	41	5.5E-06	4.9E-06		186	210	
CL	min	1500	礫～岩片状	0	2	1	6	6	2.4	0	0	99	99	35	42	42	9.3E-07	3.2E-07		244	308	300以上 バウンド
	max	3000		25	3.3	1.75	14	13	2.4	250	15	138	138	35	44	44	3.4E-06	3.1E-06	2E-06	492	842	
	ave	2250		13	2.65	1.38	10	10	2.4	125	7.5	120	120	35	43	43	1.8E-06	1.7E-06		368	555	
CM	min	3000	岩片状 コア長 5cm以下	0	3	1.5	4	4	2.5	100	0			99	40	42	3.0E-07	4.7E-08				
	max	6000		50	4.2	2.5	6	6	2.5	600	15		1470	40	44	44	9.2E-07	3.2E-07	1E-07			
	ave	4500		25	3.6	2	5	5	2.5	350	7.5		785	40	43	43	5.3E-07	1.3E-07				
CH	min	6000	短柱状 コア長 5～15cm	25	4.1	2.3	2	2	2.6	300	10		980	40	42	42		1.8E-09				
	max	12000		75	5	3.25	4	4	2.6	1100	20		1960	40	44	44		4.7E-08	1E-08			
	ave	9000		50	4.55	2.78	3	3	2.6	700	15		1470	40	43	43		1.2E-08				
B	min		棒状 15cm以上	60		3.25				600	15		1470	40	42	42						
	max			90		4.75				1500	25		2450	40	44	44						
	ave			75		4				1050	20		1960	40	43	43						
参考文献		2)P17	2)P17	2)P17	2)P17	2)P91	2)P17	3)P14	2)P17	10)p201	10)p209	9)p10		10)p209	9)p10					8)P687	9)P13	

9. おわりに

今回は基本的に本州四国連絡橋公団の「風化花崗岩の支持力特性判定要領 (案)」²⁾ をベースに他の指標をとりまとめたが、バラツキは大きく、あくまで目安としての指標である。ただ、概査の時点においては有効と考えている。今後、他のデータも加えて実務上より活用しやすい指標案を構築していきたい。

参考文献

- 1) 木村隆行, 渡辺俊一, 今田真治, 西垣誠: 不圧および被圧井戸における限界揚水量の水位低下率の事例研究, 地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.40, No1pp73-79, 2022.
- 2) 本州四国連絡橋公団: 風化花崗岩の支持力特性判定要領 (案), pp.47-107, 1980.
- 3) 山本荘毅: 新版地下水調査法, 古今書院, pp.12-28, 1983.
- 4) 澤田淳, 竹内真司, 三枝博光, 天野健治: 亀裂性岩盤におけるボーリング調査に基づく水理学的有効間隙率の設定について, 土木学会第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.273-278, 2007.
- 5) Rhén, I., Gustafson, G., Standorts, R., Wikberg, P.: Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5, Models based on site characterization 1986-1995, SKB TR 97-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1997.
- 6) 小鯛桂一: 岩盤透水性のグラフ表示, 地質調査所月報, 第 5 巻, 第 9 号, pp.419-434, 1984.
- 7) 渡辺邦夫: 山地地下水解析上の諸問題 (その 3), 地下水と井戸とポンプ, 第 26 巻, 第 11 号, pp.2-8, 1984.
- 8) 地盤工学会: 地盤調査の方法と解説, pp.686-687, 2013.
- 9) NEXCO: 設計要領第二集橋梁設計編, pp.4-14, 2016.
- 10) 三木幸蔵: わかりやすい岩石と岩盤の知識, pp.198-206, 1978.