

粗粒材の飽和透水特性に関する実験的研究

工藤アキヒコ¹・西垣誠²・西方卯佐男³・鳥居剛⁴・浅田昌蔵⁴

- ¹正会員 工修 関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20)
²正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中2-1-1)
³正会員 株式会社関西総合環境センター (〒541-0052 大阪市中央区安土町1-3-15)
⁴正会員 工修 株式会社建設企画コンサルタント (〒550-0004 大阪市西区鞠本町3-5-25)

ロックフィルダムで用いるような粗粒材の透水係数と粒度との関係を解明する目的で、大型透水試験装置を試作し、相似粒度と種々の粒度 (U_c が6~30程度)を持つ試料を用いて透水試験を実施した。その結果、粗粒材の透水係数は、 D_{10} が数mmオーダーとなるロック材では、少なくとも1cm/s以上であること、動水勾配が0.01~0.2の範囲で、透水係数がおよそ0.1cm/s以上となる試料では、動水勾配依存性が認められること、 D_{10} などの細粒分が支配的ではあるが、 D_{60} などのより大きな粒径の影響も受けていることなどを明らかにした。また、粗粒材の透水係数は、TerzaghiやPoiseuilleが示す D_n^b の形よりも、 D_{10}^a と D_{60}^b の積の形とする方が、より精度良く推定できることを示した。

Key Words : *coefficient of permeability , rockfill dam , coarse granular materials , permeability test*

1. はじめに

近年、揚水発電所調整池の利用水深は、より大きなものが採用される傾向にあり、ロックフィルダムの貯水位急低下時における上流ロック内の残留水面をより精度良く推定し、安定性を評価することが緊急かつ重要な課題となっている。しかし、透水性の高いロック材の飽和透水係数については、既往研究も少なく、これまでに、大型透水試験装置とロック材の相似粒度試料を用いた大長の研究¹⁾、赤司・高田の研究²⁾、砕石を対象とした松尾・木暮の研究³⁾、地盤凍結法で採取した不攪乱礫質土を用いたHatanakaらの研究⁴⁾、海外では、路盤材を対象としたRandolphらの研究⁵⁾、ダムロック材を対象としたHansenらの研究⁶⁾、Semenelli and Castroの研究⁷⁾がある程度で、ダム上流側ゾーンのフィルター材からロック材に相当する粗粒材の飽和透水係数はよくわかっていないのが現状である。

一般に、ロックフィルダムの水位急低下時の安定性は、古くは電気相似法⁸⁾やhell-showモデル⁸⁾等の実験的手法で、近年では、非正常飽和・不飽和浸透流解析⁹⁾による解析的手法で上流ロック内の残留水位面を推定し、残留水位を考慮した安定計算¹⁰⁾を実施することで評価されている。浸透流解析に用いるロック材

の飽和透水係数は、供試体直径が30cm程度の透水試験に基づき、0.1cm/s程度の値が採用されることが多く、この値を用いたロックゾーンとフィルターゾーンの境界における残留水位は、水位低下量の50%あるいはそれ以上になるとした報告もある¹¹⁾。一方、実ダムの計測においては、水位急低下時の上流ロック内の水位は、貯水位と比較的一致し、そうした大きな残留水位は生じていない¹¹⁾。このことから、これまで浸透流解析において、ロック材の透水係数として一般的に採用していた0.1cm/s程度の値は、実ダムのそれを過小評価していると考えられる。

従来より利用水深が大きく、かつ水位低下速度が大きいロックフィルダムの設計において、ロック材の透水係数に0.1cm/s程度の経験的な値を採用した場合には、残留水位はかなり大きくなると予想される。このことは、斜面の安定性評価に最も影響を与える因子の一つである間隙水圧が高くなることを意味しており、従来の斜面勾配では、水位急低下時の斜面の安定を保つことが難しくなることを意味している。従って、精度の高い飽和透水係数を推定することは、水位急低下時のダムの安定性評価において重要と考えられる。

このような背景から、本研究では、通常の直径30cmの供試体を用いた透水試験では、最大粒径が200mm~600mmもある大きな粒径を持つ試料の透水係数を求め

ることはできないので、室内試験で可能な限り大きな直径 120cm の大型透水試験装置を試作し、実粒度の相似粒度試料を用いて、供試体寸法と粒径を変えた一連の透水試験を行って、実粒度相当の透水係数を推定しようとするものである。また、種々の粒度を持つ試料の透水係数と粒度の関係から、フィルター材からロック材に相当する粗粒材の透水係数に試料の粒径とその構成比がどのように影響しているのかを明らかにするとともに、試料の密度と粒径をパラメータとする透水係数の推定法を提案する。

2. 試験方法

(1) 試験装置

研究に用いた試験装置はすべて定水位型で、透水円筒の直径は 10cm から 120cm の 5 種類である。表-1 に試験装置および供試体の寸法を示す。

図-1 に試作した直径 120cm の大型透水試験装置の構造と寸法を示す。越流水槽は、ステンレス鋼板製（側板： $t=1.5\text{mm}$ 、底板： $t=6\text{mm}$ ）で直径 165cm、高さ 166cm あり、透水円筒は、強化プラスチック製（ $t=24\text{mm}$ ）で内径 120cm、高さ 188cm で、試験後の試料の取り出しを容易にするために 3 分割としてある。透水円筒は溝型鋼（アルミ製： $50\times 100\times 3\text{mm}$ ）をすのこ状に配し、その上に置いている。また、フィルター層として、溝型鋼の上に目合いの異なる 3 種類の金網（目合い 5, 20, 100mm）を敷いている。

試験には貯め置き水を用いる必要があったので、屋外に大型貯水槽（ $W2\text{m}\times L3\text{m}\times H2\text{m}$ ）を設けて水道水を貯め置いた。直径 120cm の試験では、使用水量が多いので、屋外の貯水槽から直接ポンプで給水し、給水パイプにバルブを設けて水量を調節する方法を、直径 10cm から 60cm の試験では、屋外の貯水槽の水を屋内の定水位槽に入れ、定水位槽から小型のポンプで給水し、バルブで水量を調節する方法を取った。

(2) 供試体の作成方法

締め固め層数は 5 層とし、粗粒材と細粒材の分離を防ぐために層毎に所定の重量の気乾試料に加水し、含水比を 2% に調整した。その後、層毎に調整試料を透水円筒に投入して所定の密度となるようにランマーで締め固めた。ランマーは、供試体直径が 10cm と 15cm では締め固め試験用の 4.5kg ランマーを、30cm～120cm では直径 20cm、重さ 14kg のランマーを用いた。また、供試体直径が 120cm の試験では、各層をさらに 3 層の補助層に分けた。粒径が 150mm～200mm のレキは、各補助層において、図-2 に示すように透水円筒の内壁か

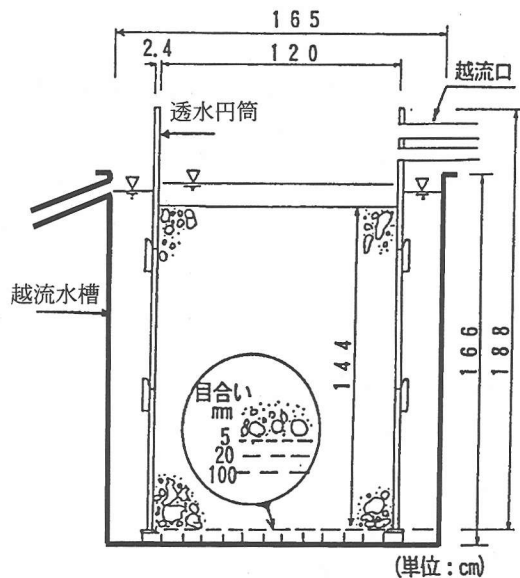


図-1 大型透水試験装置

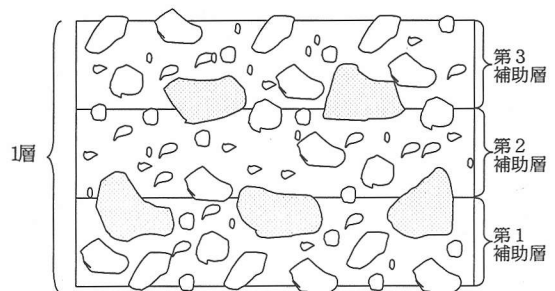


図-2 大型透水試験（直径 120cm）の締め固め層の模式図

ら少し離し、適切に分散配置し、レキの集中を防ぐとともに壁面の影響を極力なくした。

(3) 試験手順

試験は JIS A 1218 に準じて定水位法で行った。供試体の飽和化は、予め供試体を設置した越流水槽に貯め置き水を注水して、供試体内に浸透させた。注水は、透水円筒の水位が越流水槽の水位上昇に十分追従できる速度とし、要した時間は、供試体径が 10cm、15cm では 45 分程度、30cm、60cm では 60 分程度、120cm では 120 分程度である。粗粒材では、透水係数は動水勾配の影響を受けると考えられたので、同一供試体で水頭差を数種設定して試験した。水頭差は、供試体直径が 10cm と 15cm では、透水円筒の高さをネジで調節し、透水円筒と越流水槽のそれぞれの越流口から流出させることで調節した。また、供試体直径が 30cm と 60cm

では、越流水槽の水位は越流水位とし、透水円筒の水位を、それが越流口に達するまでは流入水量をバルブで調節し、越流口に達した後は越流口のせき板の高さで調節した。また、供試体直径が120cmでは、透水円筒への流入水量をバルブで調整した。試験を行った動水勾配のおよその範囲は、表-1に示すとおりである。

水頭差と流量は、それらが定常となってから、水頭差については、透水円筒と越流水槽の水位をポイントゲージで測定し、流量については、越流水槽からの越流水を容器に受け、その間の時間と重量から計算した。定常状態となるのに要した時間は、供試体直径が120cmでは約10分、60cmでは15分、30cmでは20分、15cmでは30分程度であった。

3. 相似粒度を用いた透水試験

(1) 試験条件

a) 試験試料

試験には、近畿・中国地方に広く分布する頁岩と花崗岩を用いた。図-3 a, 図-3 bに試料の粒径加積曲線を、表-2に粒度特性を示す。図中の点線で示す最大粒径 D_{max} が400mmの粒度分布は、実際のダムロック材に相当する粒度(実粒度と称する)である。試験粒度は、実粒度の相似粒度となるように粒径加積曲線を小粒径側に平行にシフトさせた粒度とした。試料の均等係数 U_c は頁岩で14.3、花崗岩で27.9である。試験には頁岩ではS-a~S-eで示す5種の粒度を、花崗岩ではG-a~G-dで示す4種の粒度を用いた。なお、試験に用いた頁岩、花崗岩試料は C_H 級の硬岩であり、供試体作成時の締固めに伴う粒子破碎はわずかであったことから、試験結果は試料調整時の粒度で整理している。

b) 試験ケース

表-3は、試験供試体の直径 d 、 D_{max} および間隙比 e 等の試験条件を示している。試験は、寸法比 d/D_{max} が一定となるように、 d に応じた D_{max} を持つ試料を用いて実施した。土質試験法¹⁾²⁾では、 d は D_{max} の10倍以上とされているが、 $U_c > 10$ の試料では、 d を D_{max} の5倍程度としてよいとしていることから、 d/D_{max} は6を中心に設定した。表-3に示すように、 d/D_{max} は、頁岩試料では3、6、12の3種類とし、花崗岩試料では $d/D_{max} = 6$ とした。 $d/D_{max} = 6$ の頁岩試料の試験では、実ダムのロック材の範囲に合わせて e を0.26、0.28、0.35の3種とし、 d/D_{max} が3および12の試験では、 e を0.28、0.35の2種とした。花崗岩試料では e を0.28の条件のみとした。

表-1 透水試験装置の寸法

呼び径	透水円筒 (cm)		締固め条件				動水勾配の範囲
	直径	高さ	供試体高	層厚 (cm)	層数 (cm)	締固め方法	
10	10.0	23.5	12.0	2.4	5	ランマーS	0.03~0.20
15	15.0	23.5	18.0	3.6	5	ランマーS	0.01~0.20
30	29.7	53.0	35.6	5.1	5	ランマーL	0.01~0.20
60	58.8	113.5	70.6	14.1	5	ランマーL	0.01~0.20
120	120	188.0	144	28.8 (9.6)	5 (15)	ランマーL パイプテ	0.01~0.20

層厚・層数の()内は補助層
ランマーS: 締固め試験用ランマー (φ50mm, 4.5kg)
ランマーL: コンクリート製ランマー (φ200mm, 14kg)

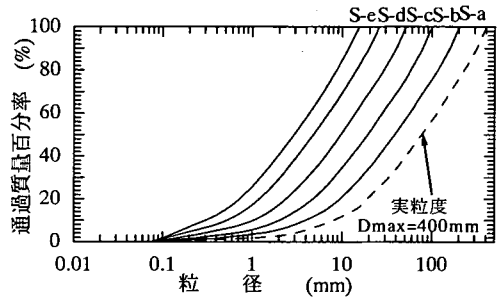


図-3 a 頁岩試料の粒径加積曲線

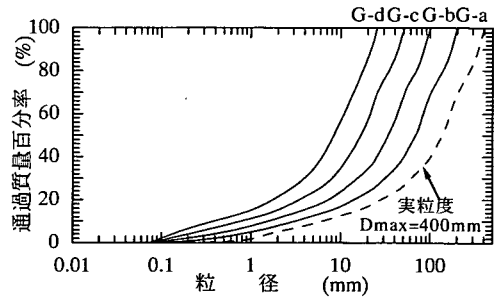


図-3 b 花崗岩試料の粒径加積曲線

表-2 試験試料の物理特性

岩種	粒度番号	最大粒径 (mm)	10% 粒径 (mm)	60% 粒径 (mm)	均等係数 U_c	土粒子密度 ρ_s
頁岩	実粒度	400	8.00	114.4	14.3	2.683
	S-a	200	4.00	57.2	14.3	2.676
	S-b	100	2.00	28.6	14.3	2.670
	S-c	50.8	1.00	14.3	14.3	2.659
	S-d	25.4	0.51	7.29	14.3	2.645
	S-e	15.4	0.33	4.72	14.3	2.633
花崗岩	実粒度	400	6.07	169.6	27.9	2.572
	G-a	200	3.02	84.8	27.9	2.565
	G-b	100	1.52	42.2	27.8	2.554
	G-c	50.8	0.760	21.1	27.8	2.534
	G-d	25.4	0.387	10.8	27.9	2.508

表-3 試験条件 (相似粒度)

岩種	寸法比 d/D_{10}	間隙比 e	均等係数 C_u	供試	最大	60%	30%	20%	10%	透水係数 ^{*)} k_{15} ($i=0.03$) cm/s
				体径 d	粒径 D_{max}	粒径 D_{60}	粒径 D_{30}	粒径 D_{20}	粒径 D_{10}	
頁岩	6	0.26	14.3	600	100	28.6	8.22	4.80	2.00	2.92E-01
				300	50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	3.63E-02
				150	25.4	7.29	2.06	1.20	0.51	1.22E-02
		100		15.4	4.34	1.25	0.73	0.30	1.67E-03	
		1200		200	57.2	16.44	9.50	4.00	2.17E+00	
		600		100	28.6	8.22	4.80	2.00	4.76E-01	
	3	0.28	14.3	600	100	28.6	8.22	4.80	2.00	6.10E-02
				150	25.4	7.29	2.06	1.20	0.51	1.22E-02
				100	15.4	4.34	1.25	0.73	0.30	5.49E-03
		0.35		600	100	28.6	8.22	4.80	2.00	1.08E+00
		300		50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	2.33E-01	
		150		25.4	7.29	2.06	1.20	0.51	5.65E-02	
12	0.28	14.3	600	200	57.2	16.44	9.50	4.00	1.06E+00	
			300	100	28.6	8.22	4.80	2.00	3.64E-01	
			150	50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	5.23E-02	
	0.35		300	100	28.6	8.22	4.80	2.00	1.04E+00	
	150		50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	2.38E-01		
	600		50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	1.05E-01		
花崗岩	6	0.28	27.9	300	25.4	7.29	2.06	1.20	0.51	2.16E-02
				600	50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	1.70E-01
				300	25.4	7.29	2.06	1.20	0.51	5.64E-02
				1200	200	84.8	32.0	14.1	3.02	2.07E+00
				600	100	42.2	16.0	7.04	1.52	6.37E-01
				300	50.8	21.1	8.00	3.52	0.76	2.83E-01
				150	25.4	10.8	4.00	1.76	0.387	1.86E-01
										2.42E-02
										1.86E-02
										1.48E-02

*) : 試験結果

(2) 試験結果

a) 飽和透水係数と10%粒径の関係

図-4 a, 図-4 bは, 動水勾配 i が 0.03 の時の 15℃における飽和透水係数 k_{15} と 10%粒径 D_{10} との関係を示している。 D_{10} で整理したのは, 後述する種々の粒度を持つ試料の試験で, D_{10} を透水係数の第1支配因子と考えたことによる。 図に示すように, いずれの岩種においても, D_{10} と k_{15} との関係は, 両対数紙上でほぼ直線で表される。 e が異なっても同様である。 このことは, 大長¹⁾が D_{10} と k_{15} の関係に単調性があることを示している点と一致している。

従来, ダムロック材の設計透水係数は, 0.1cm/s 程度の値とされることが多かったが, 一般に実ダムで使用されるロック材の D_{10} は 2mm 以上であることから, 図-4 の関係から少なくとも 1.0cm/s 程度の値を採用できると考えられる。 この値は, 太田ダム¹¹⁾や喜撰山ダム¹³⁾において, 施工中に行われた現場透水試験による透水係数のオーダ ($10^0 \sim 10^2$ cm/s) と一致する。

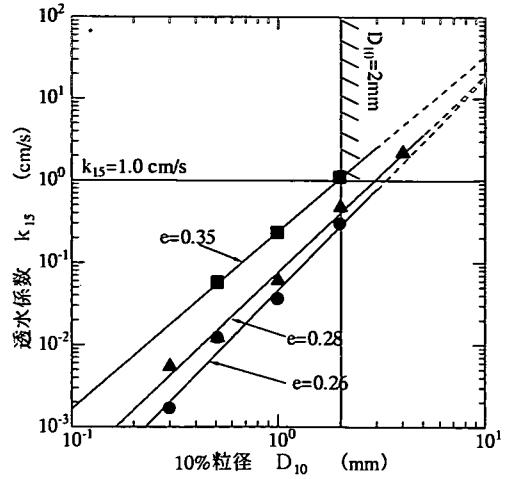


図-4 a 頁岩の透水係数と10%粒径の関係
($e=0.26 \sim 0.35$, $d/D_{max}=6$, $i=0.03$)

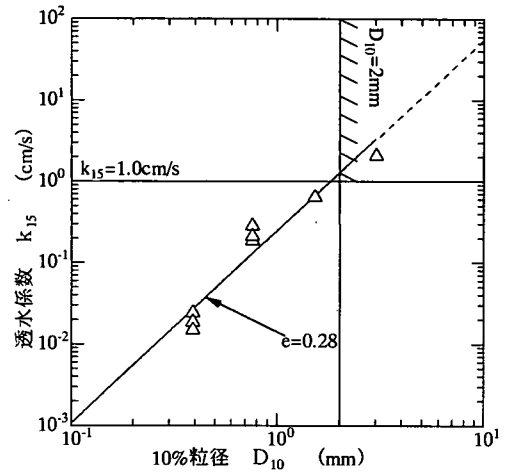


図-4 b 花崗岩の透水係数と10%粒径の関係
($e=0.28$, $d/D_{max}=6$, $i=0.03$)

したがって, 実ダムのロック材の透水係数は, 従来用いられてきた設計値より少なくとも1オーダー以上大きいものと推定される。

b) 飽和透水係数と動水勾配の関係

図-5 a, 図-5 bは, 流速 v と i との関係を示している。 図中の点線は, v と i が比例関係にあり, ダルシー則に従うラインである。 図に示すように, 頁岩試料の S-a, S-b, 花崗岩試料の G-a~G-c の勾配は, 点線よりも緩くダルシー則に従っていない。

図-6 a, 図-6 bは, 管径を D_{10} として求めたレイノルズ数 Re と D_{10} の関係を示している。 図中の黒塗印は, 図-5 においてダルシー則から外れるデータを, 白抜印は, ダルシー則に従うデータを示している。

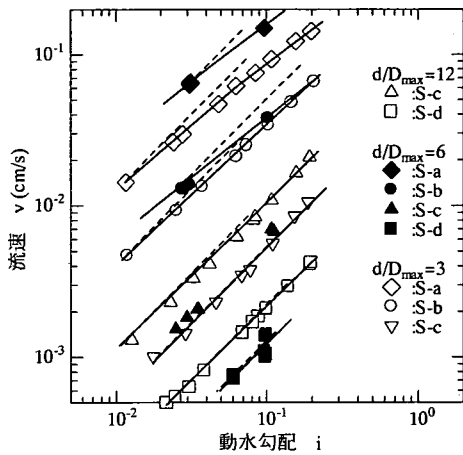


図-5 a 頁岩の流速と動水勾配の関係 ($e=0.28$, $U_c=14.3$)

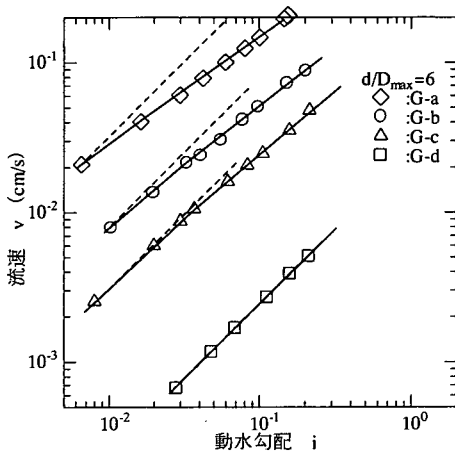


図-5 b 花崗岩の流速と動水勾配の関係 ($e=0.28$, $U_c=27.9$)

図中の実線は、その境界、すなわち限界レイノルズ数と D_{10} の関係を示すラインで、限界レイノルズ数はおよそ0.2以下である。図中の点線と一点鎖線は、単一粒径に近い試料を用いた松尾・木暮³⁾による関係とダムロック材を用いた大長¹⁾による関係である。これらの関係との比較から、本試験の限界レイノルズ数は、松尾らや大長の関係より小さいことがわかる。これは、今回用いた試料の D_{10} と間隙比が、松尾らの実験試料に比べて格段に小さく、また、大長の実験試料と比べても間隙比が小さいことから、土粒子の間隙径が小さく、限界レイノルズ数が小さくなったと考えられる。

図-7 a, 図-7 bは、図-5に示したデータから求めた k_{15} と i の関係を示している。図-5においてダルシー則から外れる頁岩試料のS-aとS-b、花崗岩試料のG-a~G-cの k_{15} は、 i の増加とともに小さくなっており、動水勾配依存性が認められる。試験

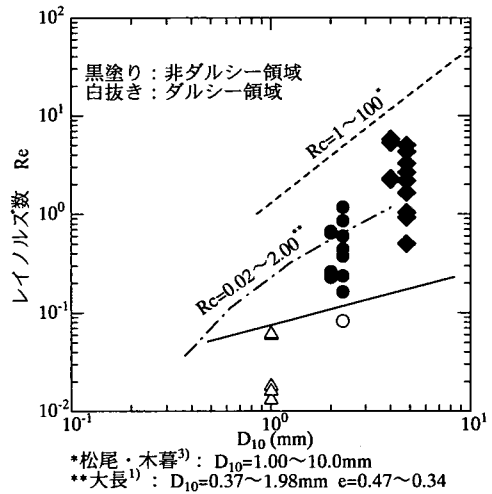


図-6 a 頁岩のレイノルズ数と D_{10} の関係

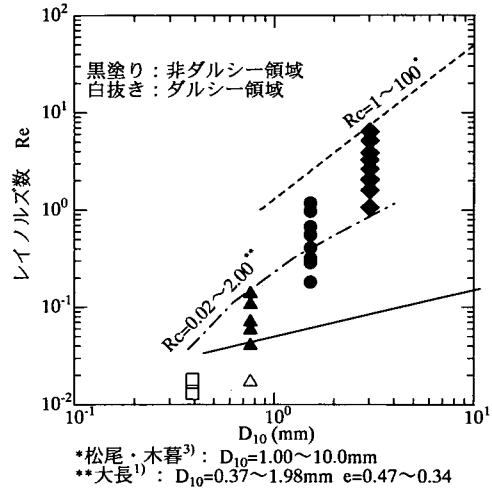


図-6 b 花崗岩のレイノルズ数と D_{10} の関係

した動水勾配の範囲では、透水係数が概ね0.1cm/sより大きい場合にダルシー則から外れ、動水勾配依存性が認められる。このことは、ダムロック材では、透水係数が少なくとも1cm/sはあると考えられるので、水位急低下時の動水勾配は比較的小さく、その影響は少ないと考えられるが、透水係数が大きく動水勾配が大きい砂礫層内の浸透現象、たとえば揚水試験などの解析では、その影響を考慮する必要のあることを示すものである。

図-8 a, 図-8 bは、動水勾配を変化させた一連の計測の1回目と2回目の結果を示している。図に示すように、2回目においても初回と同様のデータが得られていることから、ダルシー則から外れ動水勾配依存性を示す現象は、目詰まりによるものではないことがわかる。

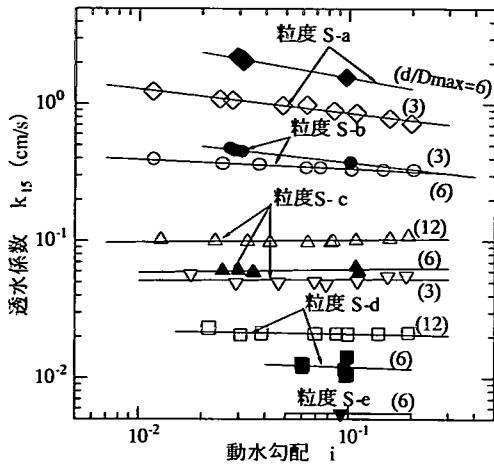


図-7 a 頁岩の透水係数と動水勾配の関係
($e=0.28$, $d/D_{max}=3\sim 12$, $U_c=14.3$)

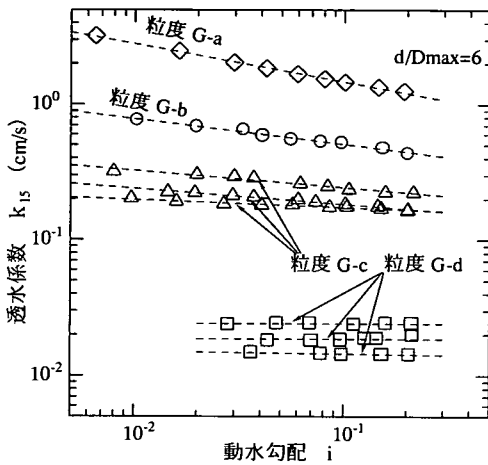


図-7 b 花崗岩の透水係数と動水勾配の関係
($e=0.28$, $d/D_{max}=6$, $U_c=27.9$)

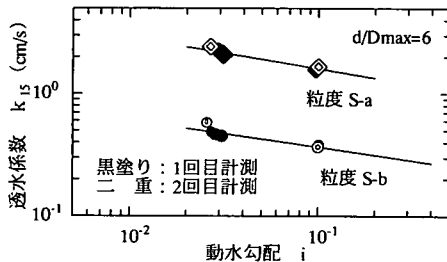


図-8 a 頁岩の1回目と2回目の計測における透水係数の比較

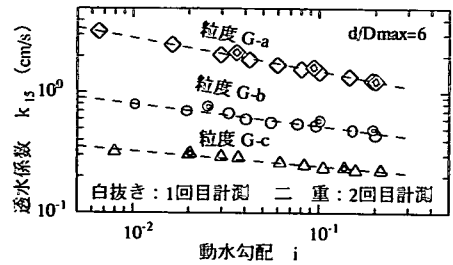


図-8 b 花崗岩の1回目と2回目の計測における透水係数の比較

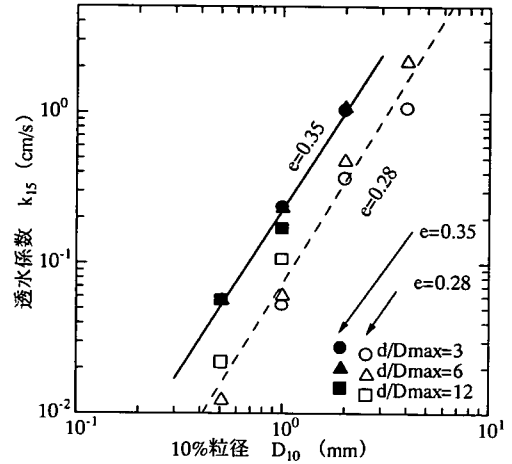


図-9 d/D_{max} をパラメータとした透水係数と10%粒径の関係 (頁岩, $U_c=14.3$, $i=0.03$)

c) d/D_{max} が透水係数に与える影響

図-9は、頁岩試料で d/D_{max} を12, 6, 3とした場合の k_{15} と D_{10} との関係を示している。これによると、 $e=0.35$ では d/D_{max} の影響は認められないが、 $e=0.28$ では $d/D_{max}=12$ の透水係数は、 $d/D_{max}=3$ の約2倍となっており、試験スケールの影響が認められる。このことは、 U_c が15程度以上の良好な粒度分布を有する試料であっても、間隙比によっては対象とする問題に応じて d/D_{max} を適切に設定する必要があることを意味している。

図に示すように、間隙比が小さい場合の透水係数は d/D_{max} が小さいほど小さく、ロックフィルダムの水急低下問題に限れば、 d/D_{max} を3とする条件で求めた透水係数を用いても、設計上は安全側の設定となる。ロック材の場合、 D_{max} が大きいので、 d/D_{max} を3とする場合と6とする場合では試験に要する労力に格段の差があることを考慮すると、学会基準¹²⁾ ($U_c > 10$ の試料で $d/D_{max} > 5$)からは外れるが、実用的には d/D_{max} を3程度とする試験でも、差し支えないと考えられる。

4. 種々の粒度を持つ試料の飽和透水試験

(1) 試験条件

透水係数を支配する粒径を調べるために、供試体直径を 30cm として、頁岩の種々の粒度を持つ試料の透水試験を行った。表-4 および図-10~図-12 に試料の粒度特性を示す。図-10 a, 図-10 b は、 D_{max} を 50.8mm とし、 D_{10} 、 D_{20} あるいは D_{30} 以下の粒度が同じで、 D_{60} が異なる場合の試験粒度を示しており、図-11 は、 D_{60} 以下の粒度が図-10 a と同じで、 D_{max} が異なる場合の試験粒度を示している。また、図-12 は、 D_{max} を 50.8mm とし、 D_{60} 以上の粒度が同じで、それ以下が異なる場合の試験粒度を示している。いずれの図においても、粒度分布の中央にある試料の粒度は共通している。図-10~図-12 の粒度に対応する試験をケース 1、ケース 2 および ケース 3 と称する。なお、表-4 には透水係数も示した。

表-4 種々の粒度を持つ試料の試験条件 (頁岩)

寸法比 $\frac{d}{D_{max}}$	間隙比 e	供試体径 d mm	最大粒径 D_{max} mm	60% 粒径 D_{60} mm	30% 粒径 D_{30} mm	20% 粒径 D_{20} mm	10% 粒径 D_{10} mm	均等係数 U_c	透水係数 ^{*)} k_{15} cm/s ($i=0.03$)			
6	0.28	300	50.8	6.00	2.70	2.00	1.00	6	4.59E-02			
				10.00	3.30	2.25		10	5.80E-02			
				14.30	4.11	2.33		14.3	8.19E-02			
				20.00	5.22	2.80		20	1.41E-01			
				28.00	6.90	3.25		28	2.06E-01			
6	0.28	300	50.8	7.20	3.20	1.00	7.2	5.89E-02				
				9.40	4.11		2.33	9.4	7.76E-02			
				14.30	4.11		2.33	14.3	9.16E-02			
				22.00	5.22		2.80	22	1.00E-01			
				28.00				28	1.28E-01			
3	0.28	300	100	28.00	6.90	3.25	28	3.29E-01				
4			75.2	20.00	5.22	2.80	20	1.64E-01				
6	0.28	300	50.8	14.30	4.11	2.33	1.00	14.3	1.38E-01			
8			38.1	10.00	3.30	2.25	10	7.21E-02				
12	0.28	300	25.4	6.00	2.70	2.00	6.0	4.38E-02				
6			0.28	300	50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	2.80	1.50	0.51
3.40	1.95	0.72								20	7.73E-02	
4.11	2.33	1.00								14.3	1.51E-01	
4.70	2.80	1.43								10	2.12E-01	
5.20	3.50	2.38								6	3.18E-01	
6	0.26	300	50.8	14.3	4.11	2.33	1.00	14.3	6.80E-02			
	0.28								9.16E-02			
	0.32								1.76E-01			
	0.32								1.88E-01			
	0.35								3.16E-01			
	0.34								2.01E-01			
	0.35								2.20E-01			
0.39	4.02E-01											
21.1	0.982	100	4.75	3.36	2.59	2.33	2.18	1.54	5.03E+00			
	0.802								2.39E+00			
	0.641								1.69E+00			

*) : 試験結果

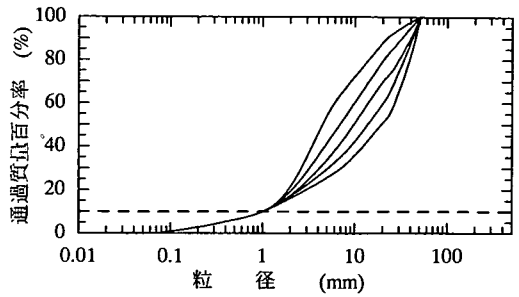


図-10 a 10% 粒径以下が同じ場合の粒度加積曲線 (頁岩, ケース 1)

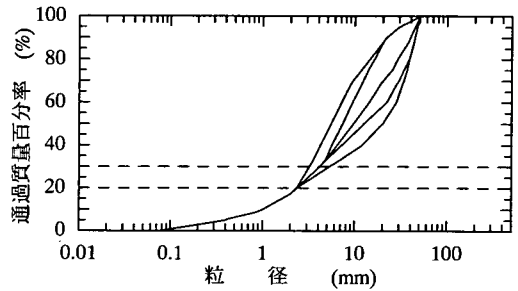


図-10 b 20% 粒径あるいは 30% 粒径以下が同じ場合の粒度加積曲線 (頁岩, ケース 1)

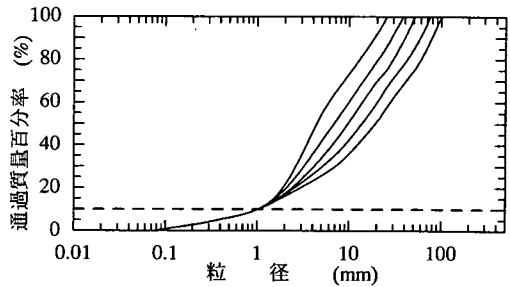


図-11 10% 粒径以下が同じで 60% 粒径および最大粒径が異なる場合の粒度加積曲線 (頁岩, ケース 2)

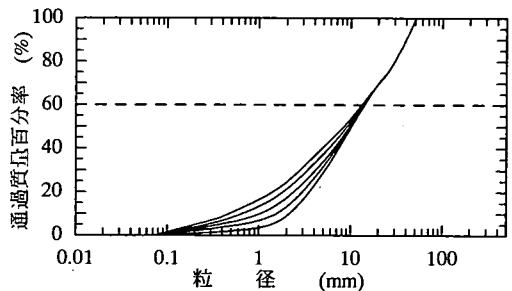


図-12 60% 粒径以上が同じでそれ以下が異なる場合の粒度加積曲線 (頁岩, ケース 3)

(2) 試験結果

図-13は、ケース1の k_{15} と U_c との関係を示している。 k_{15} と U_c の関係は、 D_{10} 、 D_{20} あるいは D_{30} 以下の粒度を同じとするいずれの粒度も、両対数紙上でほぼ直線関係で表される。 k_{15} は、 D_{30} 以下の粒径が同じでも U_c の増加とともに増加しており、 D_{30} 以上の粒径の影響も受けていることがわかる。

図-14は、ケース2の k_{15} と U_c との関係を示している。ケース1と同様に、 k_{15} と U_c の関係は、両対数紙上でほぼ直線で表される。図中には、 D_{60} 以下の粒度が同じケース1の図-10a 試料の結果も示したが、ケース2の k_{15} は、ケース1よりも大きく、 k_{15} は D_{60} 以上の粒径の影響も受けていることがわかる。

図-15は、ケース3の k_{15} と U_c との関係を示している。ケース3では、 D_{60} が同じで D_{10} のみが変化するので、 U_c は D_{10} の変化を表している。したがって、両対数紙上で直線となっている k_{15} と U_c の勾配は、ケース1と逆勾配である。図に示すように、ケース3の U_c に対する k_{15} の変化量の絶対値、すなわち直線の勾配の絶対値は、ケース1よりも大きく、 D_{60} よりも D_{10} の方がより支配的であることを示している。

上の結果から、粗粒材の透水係数は、 D_{10} 、 D_{20} といった比較的小きな粒径だけでなく、 D_{60} あるいは U_c で表される比較的大きな粒径の影響も受けていることが明らかとなった。このことは、 D_{60} あるいはそれ以上の粒径の占める割合と、透水性に支配的な影響を有すると考えられる小さな粒径の占める割合が、粗粒材の透水性を支配していることを意味している。

このような観点から次章では、大きな粒径の代表粒径 D_{60} と小さな粒径の代表粒径 D_{10} などを用いて、飽和透水係数の推定式を検討する。

5. 飽和透水係数の推定式

(1) D_{10} 、 D_{20} と k_{15} の関係

図-16、図-17は、これまで示した頁岩の相似粒度試料と種々の粒度試料の k_{15} と D_{10} 、 D_{20} との関係を示している。それぞれの図中には、Hazen 式と Creager の提案する関係も示した。図-16に示す Hazen 式の係数 $C_h=46$ は、大小粒子混合の場合であり、 $C_h=150$ は、均等な粒子の場合である。また、図-17の Creager による関係の適応範囲は、 D_{20} が2.0mmの細礫までである。図に示すように、本試験で求めた透水係数は、Hazen 式や Creager による関係と比べて1オーダー程度小さく、試験に用いた粒度や間隙比を持つ粗粒材料の透水係数の推定に、Hazen 式や Creager による関係を適用するのは無理があると考えられる。

(2) 一変数による透水係数の推定

表-3に示した頁岩の相似粒度と表-4に示した種々の粒度および単一粒度試料($U_c=1.54$)の合計53試料の試験データに基づき、 D_w 、 D_{10} 、 D_{20} 、 D_{30} および D_{60} のそれぞれを説明変数とした回帰分析を行って k_{15} の支配粒径を検討した。図-18は、検討に用いた全試料の粒度分布を示している。なお、 D_w は、次式で定義される粒径である。

$$1/D_w = \sum (p_i / D_i) \quad (1)$$

ここに、 p_i : ある粒径範囲を代表する平均粒径 D_i の試料が全試料に対して占める含有率 (重量比)

図-19は、図-18に示したそれぞれの試料の D_w と D_{10} および D_w と D_{20} の関係を示している。図中の破線と D_{10} あるいは D_{20} との交点が $D_w=D_{10}$ あるいは $D_w=D_{20}$ となる粒径であり、試験に用いた試料のうち、比較的細粒な試料の D_w は D_{20} に近く、比較的粗粒な試料の D_w は D_{10} に近いことがわかる。

k_{15} は、図-4に示した関係から、 D_{10} の2乗におよそ比例すること、密度の影響を受けることなどから、その回帰式には、密度の影響を考慮できる Poiseuille 式と Terzaghi 式を用いた。これらの式の形は以下のとおりである¹⁴⁾。

(Poiseuille 式)

$$k_{est} = C_p \frac{e^3}{1+e} D_n^{b_p} \quad (2)$$

(Terzaghi 式)

$$k_{est} = C_t \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_n^{b_t} \quad (3)$$

ここに、 C_p 、 C_t : 係数 $C = c \cdot \gamma_w / \mu$

c : 形状係数

γ_w : 水の密度

μ : 水の粘性係数

e : 間隙比

n : 間隙率

D_n : 代表粒径 (mm)

(D_w , D_{10} , D_{20} , D_{30} , D_{60})

b_p, b_t : 回帰係数

図-20は、 k_{15} を式(3)の n の項で除した値と D_{10} との関係を示している。 k_{15} を n の項で正規化することで、図-16と比べてデータのばらつきが少なくなっている。式(2)と式(3)の係数 C は、本来、粒子形状により定まる定数であるが、ここでは b と同様に変数として扱い、 k_{15} を e あるいは n の項で除した値に対して、 C と b を未知変数として回帰分析により求めた。表-5には、係数 C と b および式(2)、(3)による透水

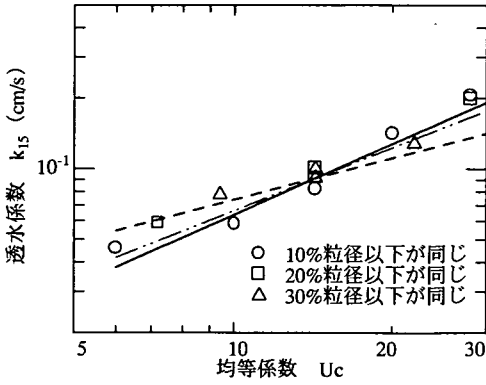


図-1 3 頁岩の透水係数と均等係数の関係
(ケース 1, $e=0.28$, $D_{max}=50.8\text{mm}$)

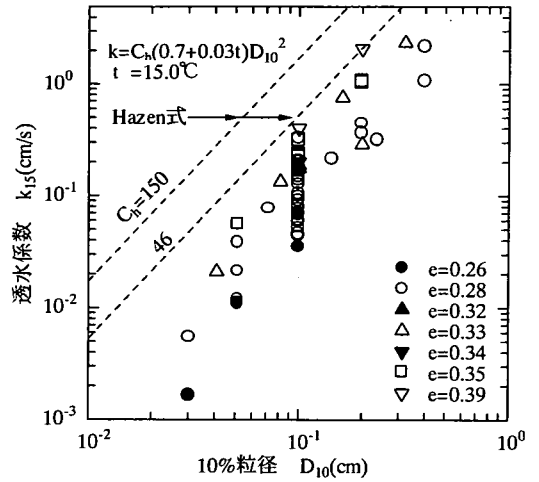


図-1 6 頁岩の透水係数と10%粒径の関係

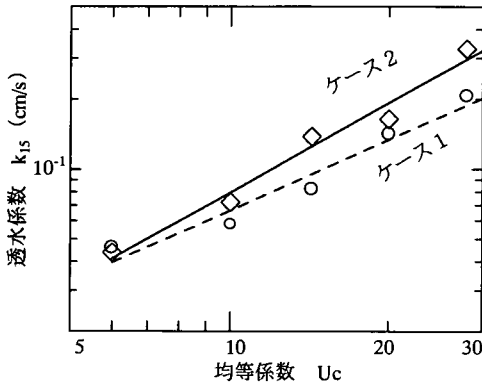


図-1 4 頁岩の透水係数と均等係数の関係
(ケース 2, $e=0.28$, $D_{max}=50.8\text{mm}$)

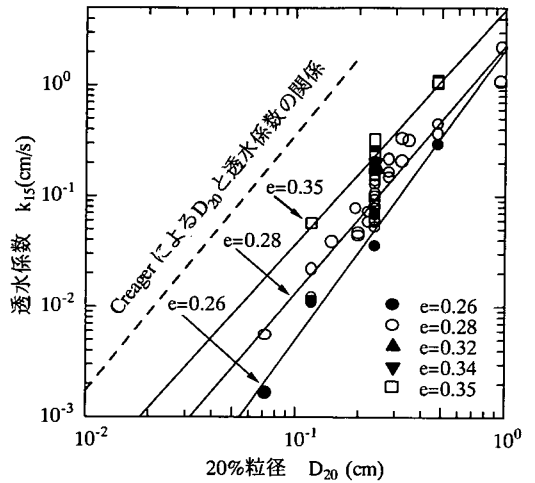


図-1 7 頁岩の透水係数と20%粒径の関係

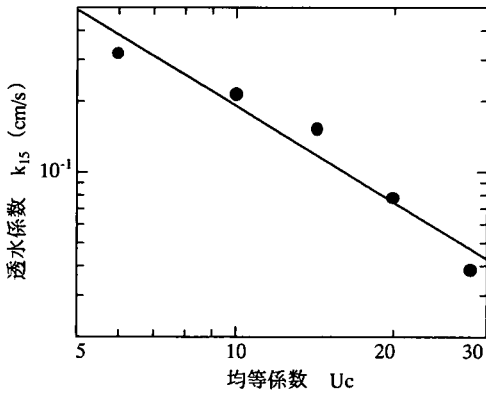


図-1 5 頁岩の透水係数と均等係数の関係
(ケース 3, $e=0.28$, $D_{max}=50.8\text{mm}$)

係数の推定値 k_{est} と試験値 k_{15} との相関係数を示した。表-5に示すように、Terzaghi 式と Poiseuille 式の相関係数は同程度であり、また、代表粒径として D_w , D_{10} , D_{20} のいずれを用いても同程度の相関係数が得られている。これに対して、 D_{30} の相関係数はそれらよりも低く、また、 D_{60} の相関係数はさらに低くなっている。このことから、試験に用いたような粗粒材の透水係数を支配する主な粒径は、 D_{10} や D_{20} といった比較的細粒の粒径であるとされる。

図-21は、 k_{15} と代表粒径に D_{10} を用いて式(3)から求めた k_{est} との関係を示している。図に示すように、データにばらつきは見られるものの、 k_{est} は k_{15} の $1/2 \sim 2$ 倍の範囲にあり、その推定精度は実用の範囲にあると考えられる。

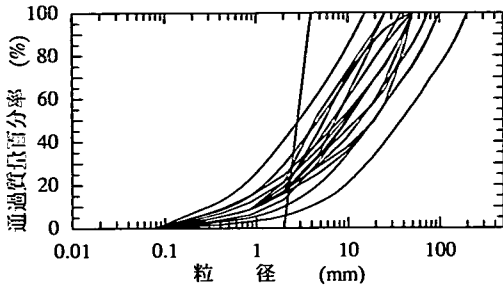


図-18 検討に用いた全試料の粒径加積曲線 (頁岩)

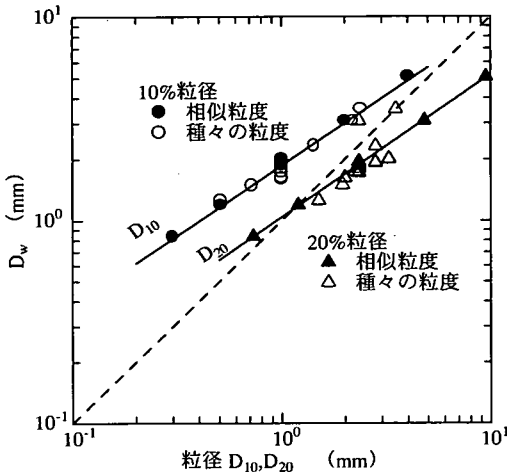


図-19 D_w と D_{10} および D_{20} の関係 (頁岩)

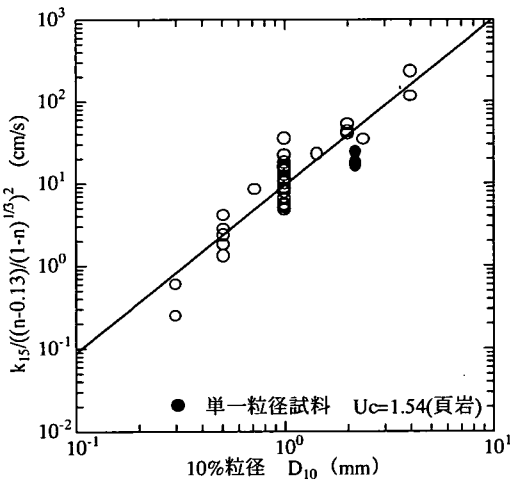


図-20 n の項で正規化した k_{15} と D_{10} の関係 (頁岩, Terzaghi式)

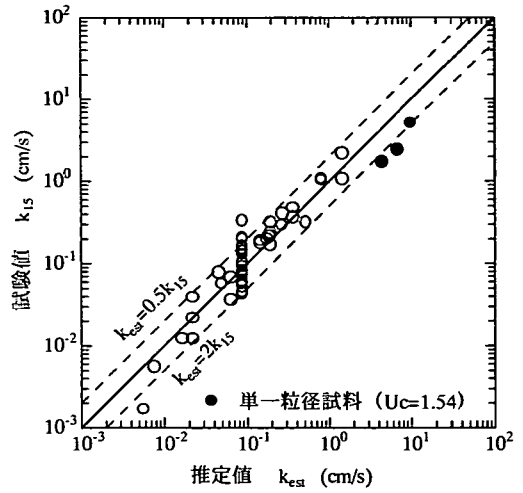


図-21 透水係数の推定値と試験値の比較 (頁岩, Terzaghi式, $D_n=D_{10}$)

表-5 D_n を変数とする回帰結果

式	係数	回帰式の変数				
		D_w	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{60}
(2)	C_p	0.82	5.34	0.786	0.309	0.197
	b_p	2.99	2.03	2.33	2.12	1.33
	相関係数	0.95	0.94	0.96	0.92	0.69
(3)	C_i	1.47	9.60	1.42	0.569	0.376
	b_i	3.00	2.04	2.32	2.11	1.30
	相関係数	0.96	0.95	0.96	0.92	0.70

(3) 二変数による透水係数の推定

粗粒材の透水係数は、図-4、図-16および図-17に示されるように、 D_{10} や D_{20} といった小さな粒径に主に支配されるが、一方で、図-13に示すように、 U_c すなわち、 D_{60} といった比較的大きな粒径の影響も受けることが明らかとなった。このことから、透水係数の説明変数に D_{60} を加えて、二変数とした場合の推定式を検討した。この検討には、一変数による場合と同じ53データを用い、二変数の代表粒径には、 (D_{10}, D_{60}) 、 (D_{20}, D_{60}) 、 (D_{30}, D_{60}) の3種を用いた。検討した推定式の形は、式(4)、式(5)に示すとおりである。ここで、二変数を積の形、 $D_n^{b1} \cdot D_m^{b2}$ で表したのは、図-4や図-13で、 k_{15} と D_{10} 、 D_{20} あるいは $U_c (=D_{60}/D_{10})$ の関係が、両対数紙上でほぼ直線関係にあることに基づくものである。

(Poiseuille 式を基本としたもの)

$$k_{est} = C_p \frac{e^3}{1+e} D_n^{b_{p1}} D_m^{b_{p2}} \quad (4)$$

(Terzaghi 式を基本としたもの)

$$k_{est} = C_t \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_n^{b_{t1}} D_m^{b_{t2}} \quad (5)$$

ここに, C_p, C_t, e, n : 式(2), (3)に同じ
 D_n, D_m : 代表粒径(mm)で (D_{10}, D_{60}),
 (D_{20}, D_{60}), (D_{30}, D_{60})
 $b_{p1}, b_{p2}, b_{t1}, b_{t2}$: 回帰係数

表-6は, 回帰分析により求めた係数 C, b_1, b_2 と回帰式による透水係数の推定値 k_{est} と k_{15} との相関係数を示している. これによると, 式(4)と式(5)の相関係数は同じ値であり, 代表粒径の組み合わせでは, D_{10} と D_{60} を用いた場合の相関係数が最も大きくなった.

図-22は, D_{10} と D_{60} を代表粒径とした場合の式(5)による k_{est} と k_{15} との関係を示している. 図-21の一変数の場合と比べて, 二変数の方がデータのばらつきが少なく, 予測精度が向上していることがわかる. この結果から, 粗粒材の透水係数は, Poiseuille 式あるいは Terzaghi 式を基本とし, 代表粒径として D_{10} と D_{60} を用いる式で精度よく推定できる.

図-23は, ロック材等の粗粒材の透水係数と表-6の D_{10} と D_{60} の係数を用い, 式(5)で計算した k_{est} との関係を示している. 一般に, ロックフィルダムのロック材は, U_c が 4~30 程度で間隙比が 0.5 以下であるものが多いが, 図に示すように, この範囲の試料の k_{est} は試験値と比較的一致している. このことから, 提案した予測式は, ダムロック材のような粗粒材に対して, 実用的な精度を有していると考えられる.

6. 結論

ロックフィルダムのロック材のような粗粒材料の飽和透水係数と粒度との関係を解明するために, 試験供試体径 d を 10cm, 15cm, 30cm, 60cm, 120cm とし, 相似粒度と種々の粒度を持つ試料 ($U_c=6$ から 28) を用いた一連の室内透水試験を実施し, 以下の結論を得た.

1) 粗粒材の透水係数を求めるために, 直径 120cm の大型透水試験装置を試作した. この試験装置では, 有孔底板の代わりに 3 種の目あいを持つ金網を重ね, その上に透水円筒を置く方法を, また, 流入水量をバルブで調節する方法を用いたが, 粗粒材で浸透水量が多くても, これらの方法で十分な精度と安定性

表-6 二変数の場合の予測結果

式	係数	回帰式の変数		
		D_{10}, D_{60}	D_{20}, D_{60}	D_{30}, D_{60}
式(4)	C_p	0.905	0.846	0.912
	b_{p1}	1.63	2.37	3.37
	b_{p2}	0.698	-0.0437	-1.09
	相関係数	0.97	0.96	0.96
式(5)	C_t	1.77	1.65	1.78
	b_{t1}	1.66	2.41	3.42
	b_{t2}	0.666	-0.088	-1.15
	相関係数	0.97	0.96	0.96

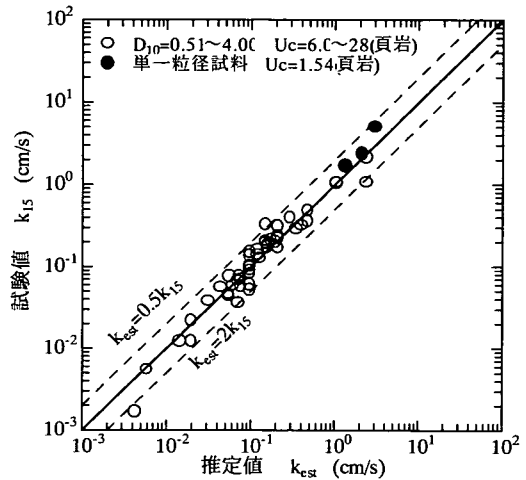
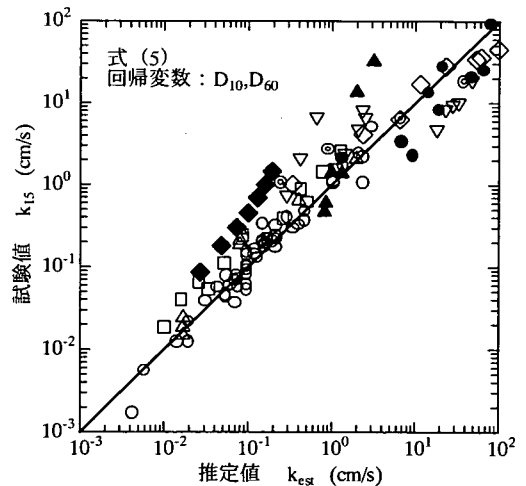


図-2-2 二変数の予測式による推定値と試験値の比較 (頁岩, 式(5), $D_n=D_{10}, D_m=D_{60}$)



- $e=0.260\sim0.982$ $D_{10}=0.30\sim4.00$ $U_c=1.5\sim28$ 頁岩
- △ $e=0.280$ $D_{10}=0.39\sim3.02$ $U_c=28$ 花崗岩
- $e=0.337\sim0.467$ $D_{10}=0.37\sim1.98$ $U_c=6.0$ 砂岩 1)
- ▽ $e=0.416\sim0.680$ $D_{10}=1.20\sim8.20$ $U_c=3.2\sim3.4$ 2)
- ◇ $e=0.750$ $D_{10}=1.00\sim13.0$ $U_c=1.2\sim1.8$ 3)
- ◆ $e=0.400\sim1.000$ $D_{10}=0.56$ $U_c=2.7$ 15)
- $e=0.220\sim0.660$ $D_{10}=6.00\sim9.20$ $U_c=4.1\sim8.2$ 片岩 16)
- ▲ $e=0.448\sim0.839$ $D_{10}=1.66$ $U_c=13$ 17)
- ◎ $e=0.563\sim1.041$ $D_{10}=0.88\sim10.8$ $U_c=1.3\sim1.7$ 硅質石 18)

図-2-3 式(5)による類似試料の透水係数の推定結果 (頁岩, 式(5), $D_n=D_{10}, D_m=D_{60}$)

を併せ持つ透水試験を行うことができた。

- 2) U_c が 15 程度以上の良好な粒度分布を有する試料であっても、間隙比によっては、供試体径 d と試料の最大粒径 D_{max} の比 d/D_{max} が透水係数に影響を及ぼすことがあるので、対象とする問題に応じてその比を適切に設定する必要があることを示した。
- 3) d を 10cm~120cm とし、 d/D_{max} を 6 とする相似粒度試料を用い、間隙比を同じとする条件で、 D_{10} が 4mm までの試料を用いて求めた k_{15} と D_{10} との関係は、両対数紙上で直線近似できることを確認した。
- 4) 従来、ロック材の設計透水係数は、 $d=30$ cm 程度の試験機で求めた 0.1 cm/s オーダの値が用いられてきたが、 $e=0.28\sim 0.35$ で D_{10} が数 mm であるダムロック材の設計透水係数は、 1 cm/s 程度の値を採用できることを示した。
- 5) 試験に用いた粒度、動水勾配では、透水係数がおよそ 0.1 cm/s 以上となる試料で、透水係数の動水勾配依存性が認められ、動水勾配がある値より大きくなると透水係数が見かけ上小さくなることを確認した。また、透水係数が大きく、かつ動水勾配が大きくなるような現象の解析においては、透水係数の動水勾配依存性を考慮することの必要性を指摘した。
- 6) 相似粒度と種々の粒度を用いた 53 試料の透水試験から、透水係数と粒度との関係を検討し、粗粒材の透水性は、 D_{10} 、 D_{20} といった細粒分が支配的ではあるが、 U_c の影響も認められ、 D_{60} などのより大きな粒径も透水性に影響を及ぼしていることを示した。
- 7) 粗粒材の透水係数を推定する際に、支配粒径として D_{10} あるいは D_{20} を単独で用いるよりも、 D_{10} と D_{60} の二粒径を用いる方が、高い推定精度が得られることを示し、代表粒径に D_{10} と D_{60} の二粒径を用いる粗粒材の透水係数推定式を提案した。

本論文では、ロックフィル材のような、良好な粒度分布を持つ粗粒材の透水特性について、主に、粒度に焦点を当てて、その影響を検討してきたが、粗粒材の透水性は、例えば、最大粒径のような大きな粒径の占める割合と、直接透水性を規定する小さな粒径の割合に支配されるという構造を持っていることが明らかになってきた。しかし、今回の試験では、それぞれが占める部分の間隙比がどのように透水性に影響を与えているのかといったことまでは踏み込めなかった。これについては、今後試験データを集積することで明らかにしていきたいと考えている。

謝辞：大型透水試験装置の試作および一連の透水試験の実施にあたり、電力中央研究所 地質部 中川加明 一郎氏には貴重なご意見を賜りました。ここに記して

感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大長昭雄：ロック材のせん断強さ、堤体内の非定常浸透流に関する模型実験および実測、発電水力、No. 53, pp. 11-23, 1970.
- 2) 赤司六哉、高田真：フィルダム用ロック材の透水係数に関する一考察、第 13 回土質工学研究発表会、pp. 161-164, 1978.
- 3) 松尾新一郎、木暮敬二：碎石の透水性に関する実験、土と基礎、Vol. 18, No. 2, pp. 5-10, 1970.
- 4) Hatanaka, M., Uchida, A., Taya, Y., Takehara, N., Hagiwara, T., Sakou, N. and Ogawa, S.: Permeability Characteristics of High-quality Undisturbed Gravelly Soils Measured in Laboratory Tests, *SOIL AND FOUNDATIONS*, Vol. 41, No. 3, pp. 45-55, 2001.
- 5) Randolph, B.W., Heydinger, A.G. and Gupta, J.D.: Laboratory Study of Hydraulic Conductivity for Coarse Aggregate Bases, *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, No. 1519, pp. 19-27, 1996.
- 6) Hansen, D., Garga, V.K. and Townsend, D.R.: Selection and Application of a One-Dimensional Non-Darcy Flow Equation for Two-Dimensional Flow Through Rockfill Embankments, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 223-232, 1995.
- 7) Sembenelli, P. and Castro, G.: Large-Scale Permeability and Compressibility Testing of Rockfill and Gravelfill Materials, *International Symposium on Recent Developments in Laboratory and Field Tests and Analysis of Geotechnical Problems*, pp. 3-13, 1986.
- 8) 最新フィルダム工学：(社) 電力土木技術協会編、pp. 303-305, 1978.
- 9) 赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集、第 264 号、pp. 87-96, 1977.
- 10) (社) 日本大ダム会議：第 2 次改訂 ダム設計基準、1978.
- 11) 関西電力株式会社：大河内水力発電所工事誌、1995.
- 12) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）第 6 編、地盤工学会、pp. 339-345, 2000.
- 13) 関西電力株式会社：喜撰山水力発電所工事誌、1970.
- 14) 土質工学ハンドブック改訂編集委員会編：土質工学ハンドブック第 3 章、土質工学会、pp. 68-69, 1997.
- 15) 松尾新一郎、木暮敬二：碎石の透水性に関する一考察、土と基礎、Vol. 17, No. 5, pp. 23-29, 1970.
- 16) 九州電力株式会社：天山ダム・発電所建設工事報告、1986.

- 17) 水資源開発公団, 中部電力株式会社: 岩屋ダム工事誌, 1977.
- 18) 西垣誠, 梅田美彦, 河野伊一郎: 高透水性材料の不飽和浸透特性の測定法, 地下水学会誌, 第35巻, 第2号, pp. 113-122, 1993.

(2001. 8. 29 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SATURATED PERMEABILITY CHARACTERISTICS OF ROCKFILL MATERIALS

Akihiko KUDOU, Makoto NISHIGAKI, Usao NISHIKATA,
Tsuyoshi TORII and Shouzou ASADA

A series of large-scale laboratory permeability tests have been conducted to clarify the effects of grain size distribution on saturated coefficient of permeability of rockfill dam material. The experimental results show that (1) the saturated coefficient of permeability K_{sat} of rockfill materials is larger than 1.0×10^0 cm/s for those with D_{10} in the order of several millimeters; (2) the saturated coefficient of permeability K_{sat} of the materials is influenced by hydraulic gradient, i for the materials with i between 0.01 and 0.2 and K_{sat} larger than 1.0×10^{-1} cm/s; (3) the saturated coefficient of permeability of coarse granular material is affected by not only the value of D_{10} but also D_{60}