

粗粒材の不飽和浸透特性の測定と粒度による影響

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 3-1-1)

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不飽和浸透特性と粒度との関係を把握するために、簡単な機構をもつ試験装置を試作し、相似粒度試料を用いて水分保持特性試験と不飽和透水試験を行なった。その結果、粗粒材の水分特性曲線は、土柱法により簡単に精度良く把握できること、不飽和透水係数は、炭酸ガスを通して作製した土柱を用いて、その上部から一定の流量を与えて供試体質量が一定となることを確認するという簡単な方法で測定できること等を確認した。また、粗粒材の不飽和浸透特性にVan Genuchtenのモデルを適用した場合、水分保持特性はよく近似できるが、不飽和透水係数は小さく見積もること、不飽和透水係数はVan GenuchtenのモデルよりもImray型の式の方がよく近似できること等を示した。

Key Words : *unsaturated permeability coefficient, water retention characteristics, rockfill dam, coarse granular materials, unsaturated permeability test*

1. はじめに

揚水式発電所調整池のロックフィルダムのすべり安定性を評価する上で、貯水位急低下時の上流ロック内の残留水位面を精度良く推定することは重要な課題の一つである。貯水位急低下を伴う上流ロック内や降雨浸透が生じる盛土内の排水層や路床など、不飽和浸透が卓越する現象の解析においては、飽和・不飽和浸透流解析が有効な手法とされている¹⁾。この解析においては、飽和透水係数に加えて不飽和浸透特性が必要とされ、通常、図-1に示す水分特性曲線(体積含水率 θ と土中水のポテンシャル ψ の関係)および θ と比透水係数 k_r (飽和透水係数に対する不飽和透水係数の比)の関係が用いられる。

これらの不飽和浸透特性は、飽和透水係数と同様に試験によって決められるべき値であるが、その測定は飽和透水試験と比べると複雑である。特に、ロックフィルダムのロック材のように、最大粒径 D_{max} が数百mmに達し、均等係数 U_c が10~30となる比較的粒度組成のよい粗粒材の不飽和浸透特性を把握する試験法には規定された方法がなく、その特性もよくわかっていない。

したがって、粗粒材の飽和・不飽和浸透流解析においては、解析パラメータは粗粒材と比べてより細粒の

砂質土を対象とした既往の試験データ等から推定して用いているのが現状である。向上・北村²⁾は、不飽和浸透特性をパラメータに感度解析を行い、解の精度を左右する要因の一つに、水分特性曲線の乾燥側の勾配がほぼ鉛直となる位置の ψ をあげ、解析には、図-1に示す最小含水量 θ_s を設定する必要があると述べている。これらのことから、粗粒材を対象とした飽和・不飽和浸透流解析において、精度の高い不飽和浸透特性を用いることは重要なことと考えられる。

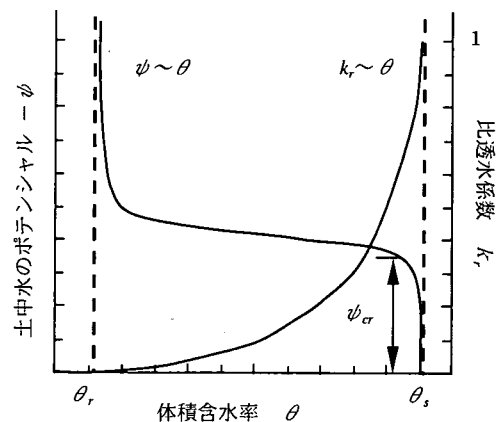


図-1 不飽和浸透特性

著者らは、すでに大型透水試験機を用いて、ロック材のような粗粒材の透水試験を行って、飽和透水係数と粒度との関係について報告³⁾したが、ロックフィルダムのロック材や路床材などの粗粒材を対象とした不飽和浸透特性についての既往研究は少なく、これまでに、 D_{max} が10mm前後までの単一粒径の礫を用いた西垣らの研究⁴⁾、 U_c が3程度で D_{max} が10mmから数十mmの礫を用いた山口・日比野の研究⁵⁾、海外では U_c が10~30で D_{max} が20mm~30mmの礫を用いたRoyらの研究⁶⁾がある程度である。したがって、不飽和浸透特性についてもできるだけ実粒度に近い試料で、可能な限り大型の試験機を用いて粒度との関係を把握して試験することも重要であるが、それにも限界があるため、粗粒材の不飽和浸透特性を予測する方法を探求することも必要である。

通常、不飽和浸透特性の測定は室内試験によって行なわれ、土質試験法⁷⁾には、 ϕ の大きな材料の水分保持特性については吸引法が示され、不飽和透水係数については、定常法ではリチャード型の装置を用いる方法、非定常法ではRIや誘電率による含水率測定と圧力計による負圧測定を同時に行う方法(瞬時水分計測法等⁸⁾)が示されている。しかし、吸引法による粗粒材の水分保持特性の測定では、ダムロック材のように密度の高い供試体を飽和したフィルターを装着した試験装置の上で締め固めると、フィルターが不飽和となったり破損したりすることが多い。また、それを避けるために別のところで供試体を締め固めた場合には、試験時の供試体とフィルターの密着度を確保することが難しい。

リチャード型の装置を用いた定常法による不飽和透水係数の測定では、飽和度の制御のために小さな空気圧を長時間一定に保つことが難しく、また、透水性の良い小さな空気浸入値(10kPa程度)を持つフィルターがなく試験が難しい。非定常法による不飽和透水係数の測定では、体積含水率や負圧の測定において、試料の粒径が大きいため局所的な値を測定する可能性があり、測定精度に問題が残る。

このような背景から、本研究は、ダムロック材のような粗粒材の相似粒度試料を用いて、水分保持特性試験については、負圧を制御する必要のない土柱法と凍結させた土柱をカッターで切断するような簡便な方法で、また、不飽和透水試験については、空気圧制御やフィルターを用いる必要のないフラックス制御型の簡易な装置を試作して一連の試験を行なって、粗粒材の粒度と不飽和浸透特性の関係について検討したものである。

2. 水分保持特性試験

前述の理由から、吸引法で粗粒材の水分保持特性を把握することが難しいので、最も簡単な土柱法⁷⁾(カラム法)を用いた。土柱法は、通常、輪切り円筒をテープで重ねたモールドに試料を入れて吸水または排水し、定常状態に達した後にテープを外して輪切り位置でずらし、円筒ごとに含水比を測定する。この方法で粗粒材の毛管飽和帯付近の含水比を測定するためには、輪切り円筒の高さをできるだけ低くする必要がある。しかし、粗粒材では礫がかみ合い輪切り位置でずらすことが困難で、正確に含水比を測定できないという問題がある。このため、土柱法と同じ方法で作製した供試体を大型冷凍庫で凍結した後に、大型コンクリートカッターで薄く輪切りにし、毛管飽和帯近傍の含水比を測定する方法(以下、凍結法と記す)についても試験した。これら2つの試験法は、排水過程を対象としたが、これは、本研究が揚水式発電所貯水池のロックフィルダムの水位急低下過程における上流のり面のすべり安定問題を対象としていることに対応するものである。以下にこれらの試験方法と結果を述べる。

(1) 試験装置および供試体作製方法

試験に用いたモールドは、土柱法では、試料の採取を正確かつ容易にするために、直径196mm、高さ50mmの輪切り円筒(塩化ビニル製:VP200)を多段に積み重ねたものを用い、凍結法では、冷凍庫の大きさと大型コンクリートカッターによる切断を考慮して、直径196mm、高さ700mmの円筒管(塩化ビニル製:VP200)を用いた。また、供試体底面は、常に一定水位(自由水面)の底水槽に浸す構造とした。図-2に試作した水分保持特性試験装置を示す。

供試体は、1層を50mmとし、粗粒材と細粒材の分離を防ぐために、層毎に所定の気乾燥試料に加水し2%の含水比となるように調整した。その後、層毎に試料をモールドに投入して、所定の密度となるように2.5kgの締め固め試験用ランマーで締め固めた。なお、土柱法では、 D_{max} が50.8mmと25.4mmの試料は供試体高さを350mm(7段)とし、9.52mmの試料は700mm(14段)とした。

(2) 試験手順

試験は以下に示す手順で実施した。

- ①深さ900mmの水槽内に供試体を置き、貯め置き水を1時間かけてゆっくりと水槽内に注水し、供試体の底面から水浸させ、24時間放置する。
- ②24時間後に水槽から取り出し、下端を一定の自由水

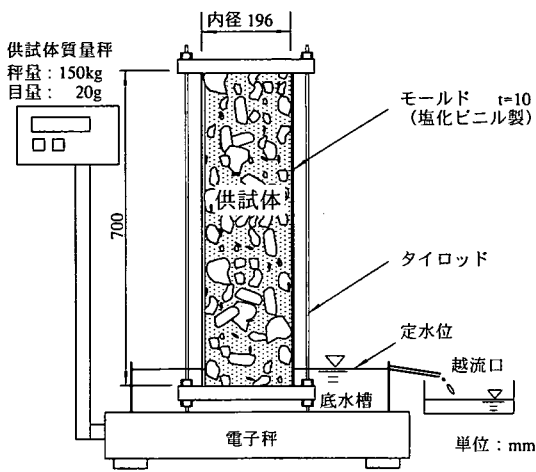


図-2 水分保持特性試験装置

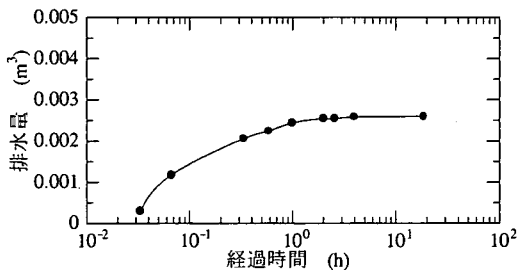


図-3 排水量の経時変化

(頁岩, 試料S-d : $D_{max}=25.4\text{mm}$, $n=0.21$)

表-1 凍結前後の供試体の直径と間隙率

(頁岩, 試料S-d : $D_{max}=25.4\text{mm}$)

底面からの測定高さ (mm)	供試体の直径 (mm)		間隙率 n	
	凍結前	凍結後	凍結前	凍結後
650	196.0	196.0	0.219	0.219
550		196.0		0.219
450		196.0		0.219
350		196.0		0.219
250		196.6		0.224
150		196.5		0.225
50		196.2		0.221

カラム高さ : 100mm

面を持つ底水槽に浸け、装置ごと電子秤(秤量 150kg, 最小目盛り 20g) に載せて供試体質量が一定となるまで排水させる。図-3は、頁岩の間隙率 n が 0.21 の最も密な供試体の排水量の経時変化を示している。図に示すように、排水は試験開始後 2 時間程度ではほぼ終了している。これより、後の作業工程の面から安全をみて排水時間を 24 時間とした。

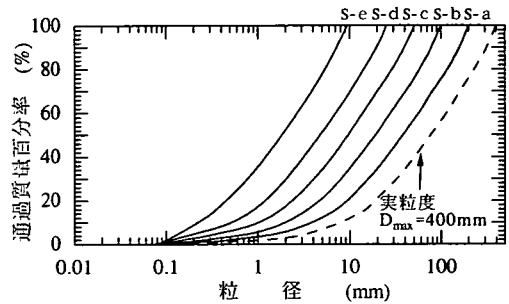


図-4 a 頁岩の試験試料の粒度分布

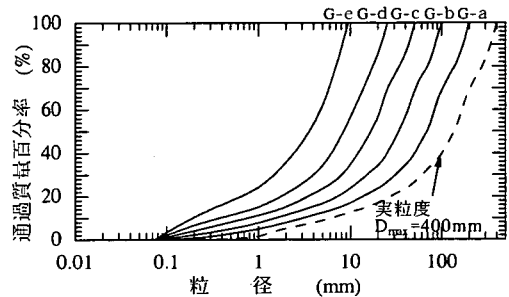


図-4 b 花崗岩の試験試料の粒度分布

③土柱法では、50mm 毎にスプーンで試料を掘り出す。掘り出した試料は炉乾燥により含水比を測定する。スプーンを用いたのは、礫粒子がかみ合って砂のように輪切り位置できちりと切ることができなかったことによる。

④凍結法では、供試体を底水槽ごと大型冷凍庫に入れて -15°C で 72 時間凍結させた後に取り出し、大型コンクリートカッターでモールドごと供試体の下半分は 25mm 間隔で、上半分は 50mm 間隔で切断し、炉乾燥により含水比を測定する。

⑤含水比と設定した供試体密度から θ を算出し、底水槽の自由水面から採取試料の中心までの高さを ψ と等価なものとして整理する。

表-1 は、凍結の前後にテープで測定したカラムの直径とそれに基づく n の変化を示している。なお、直径と同時に測定した供試体の高さは、凍結の前後で変化は見られなかった。表に示すように、凍結の前後で試料の間隙率の変化は最大でも 0.006 程度であり、無視できる範囲内であると考えられる。

(3) 試験条件

図-4 a, 図-4 b は、本研究に用いた全試料の粒径加積曲線を示している。図中の D_{max} が 400mm の点線で示す粒度は、実際のダムロック材に相当する粒度(実粒度と記す)で、試験には、この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移動させた粒度の試料を用い

た。試料の U_c は頁岩で 14, 花崗岩で 28 である。表-2 に試験試料の物理特性を示す。水分保持特性試験では、図-4 に示す頁岩と花崗岩の粒度 S-c ~ S-e と G-c ~ G-e のそれぞれ 3 試料を用いた。また、供試体の n は 0.22 となるように締め固めた。

(4) 試験結果

図-5 a, 図-5 b は、頁岩と花崗岩の ψ と θ の関係を示している。図-1 に示す水分特性曲線の飽和側の立上がり高さである ψ_a の水頭換算値の絶対値は、限界毛管水頭と呼ばれ、水分保持特性を特徴付ける値とされている。砂の限界毛管水頭は、これまでに土柱法や吸引法等で多くの試験がなされており、例えば、西垣・楠見⁹⁾、河西ら¹⁰⁾、河田ら¹¹⁾ によると 10cm ~ 30cm 程度の値、すなわち、 $\psi_a = -3\text{kPa} \sim -1\text{kPa}$ 程度の値を持つとされている。一方、図-5 に示す土柱法による粗粒材の ψ_a は、 -1kPa あるいはそれ以上の値を示すことから、試験に用いた粗粒材の ψ_a は、砂と比べて大きいことがわかる。

図-5 に示すように、頁岩と花崗岩の ψ_a は、いずれも同一の θ に対して粒径が大きくなるほど大きくなっている。土柱法と凍結法を比較すると、 θ が小さい領域（供試体上部）では両者の関係はほぼ一致しているが、 θ が大きな領域（供試体下部）では、 ψ_a は凍結法の方が小さくなっている。これは、自由水面から同じ高さにある凍結法の試料の含水比が土柱法よりも大きいことを意味するもので、凍結に伴い水分の吸い上げが生じて含水比が大きくなったものと考えられる。

図-6 は、図-5 に示す土柱法と凍結法の ψ の差の最大値と D_{max} の関係を示している。凍結法の ψ_a は、頁岩と花崗岩ともに、 D_{max} が 50.8mm の試料においても土柱法の ψ と一致せず、粒径が大きくなってもなお凍結の影響を受けることがわかる。しかし、 D_{max} がさらに大きくなると、土柱法では正確な試料の掘り出しが難しくなり含水比の測定精度が問題となるのに対して、凍結法では試料を自在の厚さに切ることができるので、粒径の大きな試料にも利用できるという利点がある。したがって、凍結の影響を受けにくい粒度、例えば D_{max} が 100mm を越えるような試料では、土柱法を凍結法で代用できると考えられる。

3. 不飽和透水試験

すでに述べたように、粒径の大きい粗粒材の不飽和透水係数を求めるのに、土質試験法⁷⁾ に示されるリチャード型の装置や瞬時水分計測法などの方法を用いることは難しいので、西垣ら⁴⁾ が礫に用いたフラックス

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	土粒子の平均密度 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	9.52	0.20	2.72	14.3	2.620
花崗岩	実粒度	400	6.07	169.6	27.9	2.565
	G-a	200	3.02	84.8	27.9	2.565
	G-b	100	1.52	42.2	27.9	2.554
	G-c	50.8	0.760	21.1	27.9	2.534
	G-d	25.4	0.387	10.8	27.9	2.508
	G-e	9.52	0.172	4.76	27.9	2.472

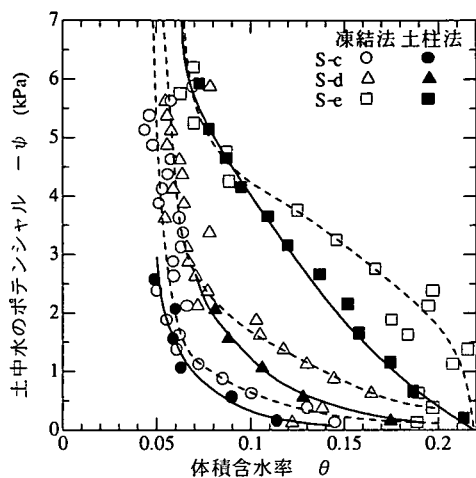


図-5 a 頁岩試料の ψ と θ の関係 ($n=0.22$)

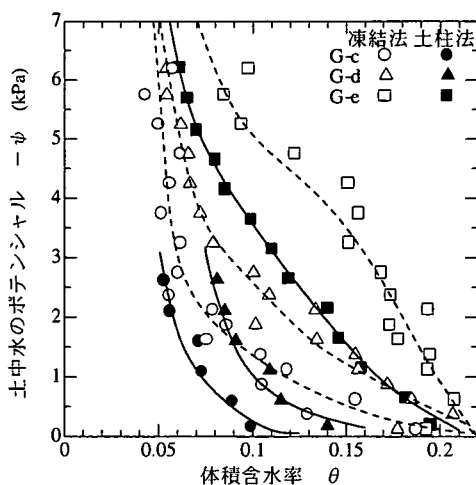


図-5 b 花崗岩試料の ψ と θ の関係 ($n=0.22$)

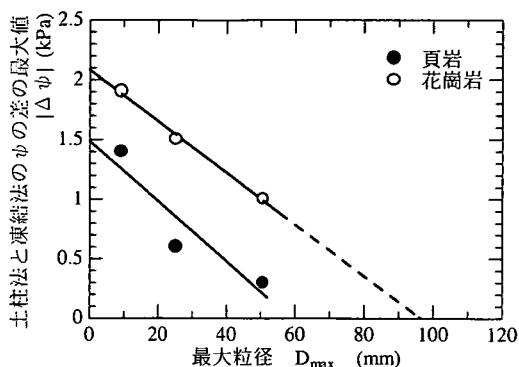


図-6 土柱法と凍結法の ψ の差の最大値と最大粒径の関係

制御型の装置をさらに大型化した試験装置を試作した。類似の装置による試験には、塩沢ら^{1,2)}の供試体直径を45mmとする小型の装置を用いた豊浦標準砂や砂丘砂を対象とした試験がある。西垣ら⁴⁾は、この装置を直径200mmと大型化し、単粒径の粗砂および粒径2.2mm~11mmの礫を対象とした試験を行っている。以下に、不飽和透水係数の試験方法と結果を示す。

(1) 計測の原理

試作した試験装置は、鉛直一次元カラムの上部から一定流量の水を供給し、定常時の供試体質量から θ を、流出流量から不飽和透水係数を求めるものである。一定流量を供試体上部に与える鉛直一次元カラムの試験から不飽和透水係数が測定できるのは、次のような考えによる。すなわち、一定量の水を供試体上面に供給して定常状態になると、供試体全体が給水流量に応じたような θ になると考える。このような鉛直一次元浸透の基礎式は式(1)で表される。

$$q = k_w(\theta) \cdot A \cdot \{ \partial(\psi/\gamma_w) / \partial z + 1 \} \quad (1)$$

ここに、

- q : 定常時の単位時間当たりの流出流量 (m^3/s)
- $k_w(\theta)$: 不飽和透水係数 (m/s)
- θ : 定常時の体積含水率
- A : 供試体断面積 (m^2)
- ψ : 土中水のポテンシャル (kPa)
- γ_w : 土中水の単位体積重量 (kN/m^3)

定常状態では、供試体内の θ がほぼ一定となるため、 $\partial(\psi/\gamma_w) / \partial z \approx 0$ になると考えると、不飽和透水係数 $k_w(\theta)$ は式(2)で求められる。また、 θ は供試体質量の変化と体積から式(3)で求められる。

$$k_w(\theta) \approx q / A \quad (2)$$

$$\theta = (m_i - m_0) / V \cdot \rho_w \quad (3)$$

- ここに、 m_i : 定常時の供試体質量 (kg)
- m_0 : 供試体の乾燥質量 (kg)
- V : 供試体体積 (m^3)
- ρ_w : 水の密度 (kg/m^3)

塩沢ら^{1,2)}は、豊浦標準砂の試験で定常状態における供試体内の2点間(上下間隔6cm)の水頭差を、間隙水圧計を用いて計測し、その水頭差が0.5cm~2cmであったと報告している。これは、式(1)の $\partial(\psi/\gamma_w) / \partial z$ が0.08~0.3(=0.5/6~2/6)の値を持つことを意味している。本研究に用いた試料は、豊浦標準砂と比べて透水性が格段に大きく、 $\partial(\psi/\gamma_w) / \partial z \approx 0$ と考えるも実用上の問題はないと考えられる。

以上より、供試体に与える給水流量を変化させることによって、体積含水率の異なる供試体の不飽和透水係数を測定することが可能となる。

(2) 試験装置および供試体作製方法

図-7 a, 図-7 bは試験装置を示している。供試体寸法は直径300mm、高さ600mmである。装置の構成は、一定量の水を供試体上面に均等に供給させる定流量ポンプ、供試体の全質量を計量する秤、供試体底面からの流出水を貯留する底水槽、流出水を計量する秤からなる。供試体上面への給水装置は、外枠で吊し供試体質量には計量されない構造となっている。供試体は、 n が0.22となるように5層で締め固めた。試料の準備や締め固めの方法は水分保持特性試験と同様とした。

(3) 試験手順

不飽和透水試験は、以下の手順で実施した。試験は、図-4に示す頁岩および花崗岩の粒度S-b~S-e、G-b~G-eを用いて行った。

- ①試料調整時および供試体締め固め時に炭酸ガスを混入しながら供試体を作製する。
- ②予め0セットした秤(秤量150kg、目量20g)に底水槽および供試体を載せた後、底水槽に水を張り試験開始時の総質量を計測する。
- ③供試体上面に定流量ポンプで一定流量の水(水道水の貯め置き水)を供給し、供給水が水滴となって落ちる気中に炭酸ガスを混入しながら、供試体質量の経時変化を計測する。
- ④供試体質量および流出流量が一定になった時点で、式(2)、式(3)により k_w および θ を算出する。
- ⑤定流量ポンプの給水流量を増加させ、供試体上面に水面が形成されるまで③、④を繰り返す。水面が形成されるまでは、給水流量は供試体への流入流量に等しい。

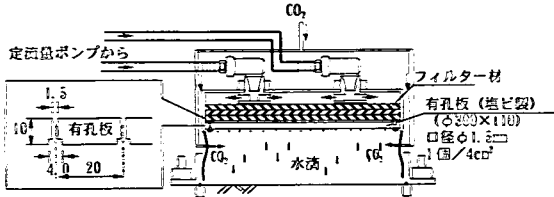


図-7 a 浸透水供給装置

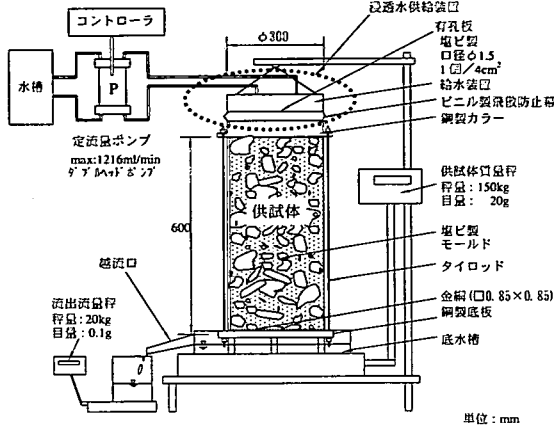
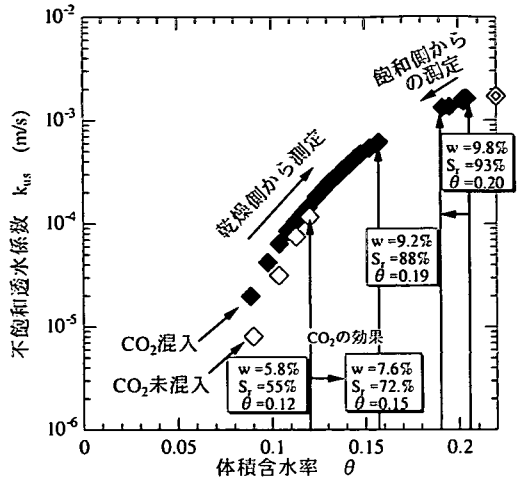


図-7 b 不飽和透水試験装置

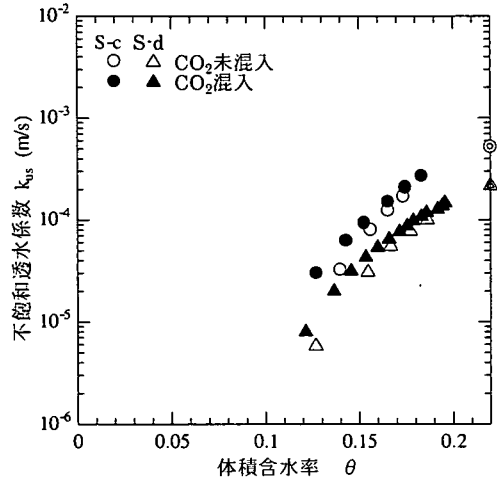
- ⑥計測を一度終了し、供試体を水槽（水深 900mm）に浸し、供試体上面の水位を外水位より低くして、供試体の下部から上部への浸透を 24 時間継続する。
- ⑦上部から水を供給し、飽和状態を保ちながら供試体を水槽より抜き上げて、その状態（動水勾配 $i=1.0$ ）で飽和透水係数を測定する。その後再び不飽和透水試験装置に移し、飽和状態から定流量ポンプの給水流量を段階的に減じながら、供試体上面の水位が急増し供給水のコントロールができなくなるまで③、④を繰り返す。

図-8は、 $D_{max}=100\text{mm}$ の試料で上記①と③の過程で炭酸ガスを用いた場合と用いなかった場合の k_{us} と θ の関係を比較したものである。図に示すように、炭酸ガスを用いなかった場合は、供試体中の空気と上からの流入水とのバランスで $\theta=0.12$ ($S_r=55\%$) 程度までしか飽和度が上がらなかったが、炭酸ガスを用いることで θ は 0.15 ($S_r=72\%$) まで測定することができた。しかし、この方法でも飽和度をこれ以上上昇させることはできなかった。このため、より飽和に近い値を得るために、飽和側から給水流量を減じる⑥、⑦の手順を用いた。図-9は、 $D_{max}=50.8\text{mm}$ と $D_{max}=25.4\text{mm}$ について行った同様の試験の結果を示しているが、図-8と同様の傾向が認められている。



◇ 同一供試体の飽和透水係数測定値 ($i=1.0$)

図-8 飽和化の方法の違いによる k_{us} と θ の関係 (頁岩, $D_{max}=100\text{mm}$, $n=0.22$, $h=600\text{mm}$)



◎ ▲ 同一供試体の飽和透水係数測定値 ($i=1.0$)

図-9 飽和化の方法の違いによる k_{us} と θ の関係 (頁岩, $D_{max}=50.8\text{mm}$, 25.4mm , $n=0.22$, $h=600\text{mm}$)

図-8と図-9において、 θ の小さい領域で炭酸ガスを用いた場合と用いない場合の k_{us} に差が見られることから、炭酸ガスの影響が懸念された。このため別途に毛管上昇試験を行った。試験は、2枚のガラス板を平行に置いて気中と炭酸ガス中で毛管上昇高さを測定するものである。試験には不飽和透水試験と同様の水道水の貯め置き水を用い、ガラス板はその表面を工業用アルコールで都度汚れをふき取ったものを用いた。図-10はこの試験の結果を示している。図に示すように、気中と炭酸ガス中では毛管上昇高さが変わらない

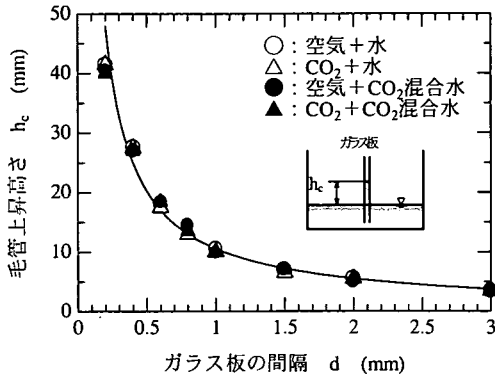


図-10 気中と炭酸ガス中における毛管上昇高さ

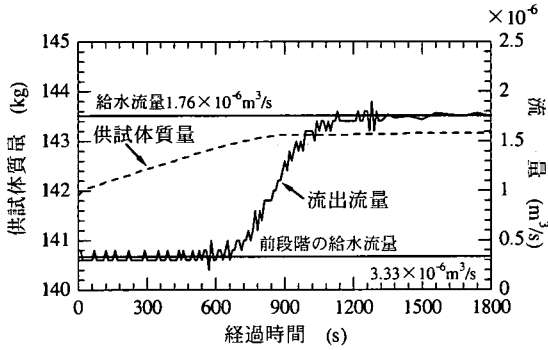


図-11 供試体質量と流出流量の経時変化
(頁岩, S-d, $n=0.22$, $h=600\text{mm}$)

ことから、炭酸ガス混入の影響は問題にならない程度のものであると推察される。

図-11は、頁岩の粒度S-d ($D_{max}=25.4\text{mm}$)を用いて $n=0.22$ の条件で行った試験の2ステップ目の供試体質量と単位時間あたりの流出流量の経時変化を示している。給水流量を前段階から増加させて、一定に保ち(この場合は $1.76 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ である)、流出流量が給水流量と等しくなるのに20分程度を要している。この状態を定常に達したと考えている。なお試験開始から1ステップ目の定常に至るまでの所要時間は2~4時間程度で、2ステップ目以降では20~30分程度であった。すべての実験で、このように給水流量と流出流量がほぼ等しく、流出流量が一定となった状態を定常浸透状態と考えて不飽和透水係数を求めている。

(4) 試験結果

図-12は、岩種および粒径をパラメータとした k_{us} と θ の関係を示している。図に示すように、片対数グラフで表す $k_{us} \sim \theta$ 関係は、岩種や粒径によらず相似の関係にあることがわかる。

図-13は k_r と θ の関係を示している。 k_r は、飽和透水係数 k_s に対する不飽和透水係数 k_{us} の比 ($= k_{us}/k_s$) で

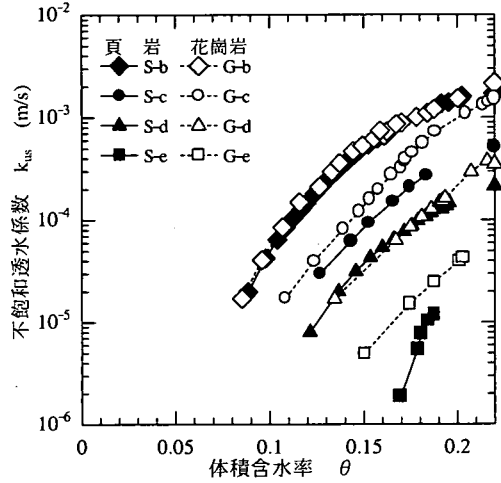


図-12 k_{us} と θ の関係 ($n=0.22$)

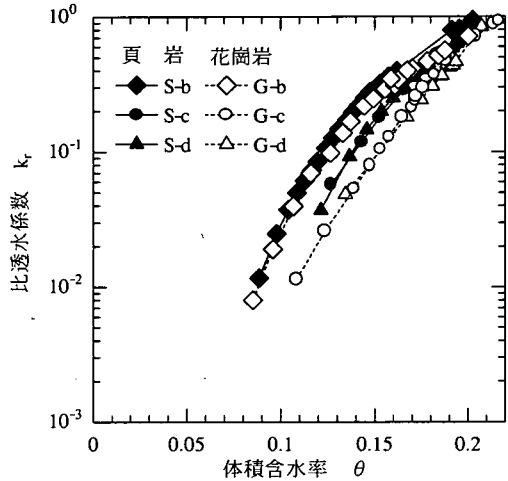


図-13 k_r と θ の関係 ($n=0.22$)

ある。 k_r の算定に用いた k_s は、図-12の飽和時の値である。図-13に示すように、 $k_r \sim \theta$ 関係は、岩種や粒径によらずほぼ一致し、実用上は粒径にかかわらず同じ関係(曲線)として扱っても良いと考えられる。

4. Van Genuchten のモデルの適用性検討

粘性土や砂質土に対しての不飽和浸透特性の推定法として用いられている^{9), 13)} Van Genuchten のモデル¹⁴⁾ (以下VGモデルと記す)が粗粒材に適用可能かどうかを検討した。

(1) Van Genuchten の手法¹⁴⁾

Van Genuchten は、式(4)で定義する有効飽和度 S_e と ψ との関係の近似式として式(5)を提案している。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

ここに、
 θ : 体積含水率
 θ_s : 飽和体積含水率 ($=n$)
 θ_r : 最小含水量

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha |\psi|)^{\beta}} \right]^{1-1/\beta} \quad (5)$$

α , β は係数であり、 α は 1/kPa の単位を持つ。 α は水分特性曲線の上下の位置を、 β は同曲線の中位の傾きを決めるパラメータである。式(5)は、水分特性曲線のS字形をきわめてうまく近似できるという特徴がある。Van Genuchtenは、Mualem¹⁵⁾の提案した k_r と S_e の関係式に式(5)を代入して、式(6)を導いている¹⁴⁾。

$$k_r = S_e^2 \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (6)$$

ここに、 $m=1-1/\beta$ であり、 β は式(5)の係数である。すなわち、Van Genuchtenの手法は、水分保持特性試験で得られる $\psi \sim \theta$ 関係を式(5)でフィッティングして、係数 α と β を定め、 β を用いて式(6)から $k_r \sim S_e$ 関係を推定するものである。

(2) 残留体積含水率

VGモデルを適用するためには、式(4)の θ_s と θ_r を決定する必要がある。 θ_s は $S_r=100\%$ の体積含水率で n に等しいとした。 θ_r は、最小含水量と称される値で、土の吸着水のように浸透によって液状では移動し得ない体積含水率である⁸⁾とされるが、 θ_r を決定する方法には定まった手法がなく、Bresler¹⁶⁾は、この値を単に気乾状態での体積含水率とし、Rogowski¹⁷⁾は、1.5MPa(15気圧)のサクションでの体積含水率としている。本研究では、対象としている揚水式発電所の貯水池の水位低下時間が6時間から12時間程度であり、浸透流解析においても同様の時間を対象とすることから、 θ_r は24時間後に最も低含水比となる土柱最上層の体積含水率を便宜的に採用した。この値を24時間後残留体積含水率と称し θ_{r24} と記す。図-3の結果からわかるように、ここで用いている試料では、24時間で排水は十分平衡に達しており、また、図-5からも明らかのように、粗粒な試料の土柱上部の θ はほぼ一定の値となっており、 $\theta_{r24} \doteq \theta_r$ としても良いと考えられる。

図-14は、 θ_{r24} と D_{10} との関係を示している。 D_{10} で整理したのは、不飽和特性を特徴づける限界毛管水頭が D_{10} に逆比例する値として知られている^{18), 19)}こ

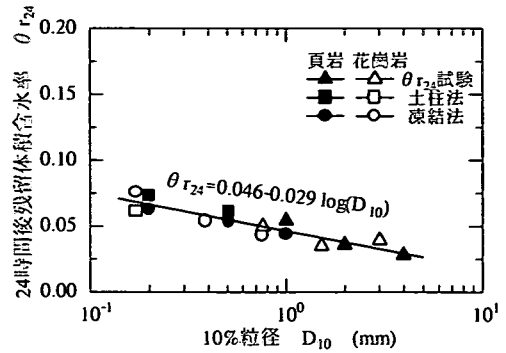


図-14 θ_{r24} と D_{10} の関係 ($n=0.22$)

表-3 θ_{r24} 試験の条件

岩種	試料		供試体寸法(mm)		計測層厚(mm)
	粒度番号	直径	高さ	(土柱最上部)	
頁岩	S-a	600	450	150	
	S-b	300	600	120	
	S-c	150	180	36	
花崗岩	G-a	1200	1440	288	
	G-b	600	720	144	
	G-c	300	360	72	

とによる。図中の土柱法と凍結法のデータは、土柱の最上層の θ_{r24} である。図中には粒径が大きいために水分保持特性試験が行えなかった $D_{max}=100\text{mm}$ 以上の試料の θ_{r24} も示してある。この値は、水分特性曲線の乾燥側の値である θ_{r24} だけを把握する目的で実施した試験(以後、 θ_{r24} 試験と記す)で求めたものである。

θ_{r24} 試験に用いた供試体の寸法は、表-3に示すとおりである。試験は、飽和透水試験用のモールドを用い、水浸した供試体の上下端面を大気解放し、下端から24時間重力排水させた後に供試体の最上層の含水比を測定したものである。図-14に示すように、これらの試験の θ_{r24} と D_{10} の関係は、片対数グラフ上でほぼ直線の関係で表される。また、頁岩と花崗岩の θ_{r24} と D_{10} の関係はほぼ一致し、試験に用いた粒度の範囲では、 θ_{r24} と D_{10} の関係は統一して扱うことができる。この関係を利用することで、試験に用いた試料よりも粗粒の材料の θ_{r24} を推定できる。

(3) Van Genuchtenのモデルと試験結果との比較

図-15a、図-15bは、頁岩と花崗岩の試験結果にVGモデルを適用した結果を示している。図は土柱法による水分保持特性試験の結果を ψ (左軸)と S_e の関係にプロットし、式(5)によるフィッティング結果を逆S字形で示している。このフィッティングには、Van Genuchtenらの提案するプログラム、RETC²⁰⁾を用いた。また、不飽和透水試

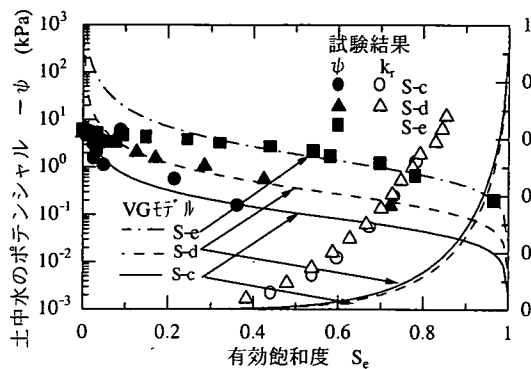


図-15 a 頁岩試料のVGモデルの適用結果

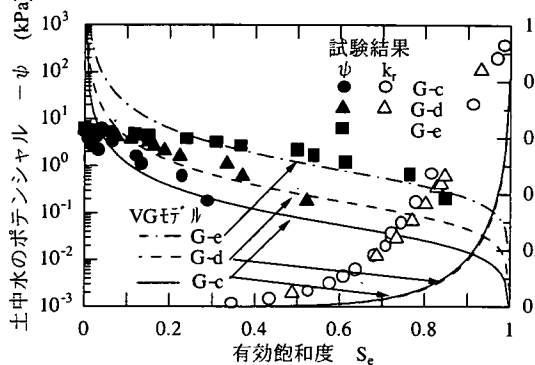


図-15 b 花崗岩試料のVGモデルの適用結果

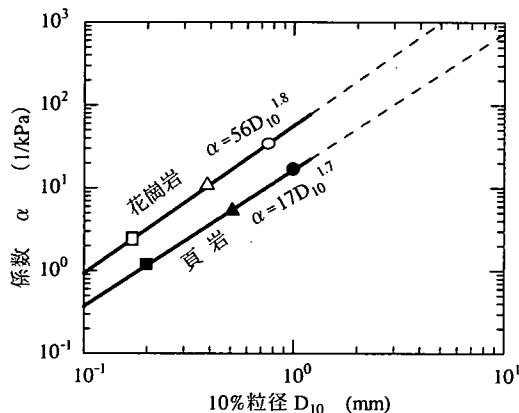


図-16 係数 α と D_{10} の関係

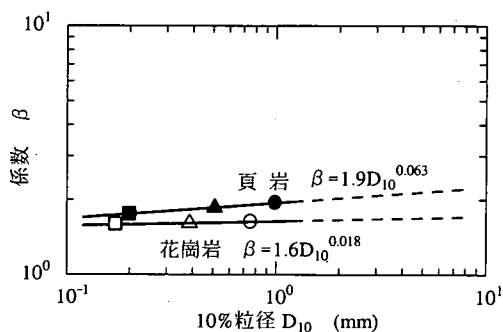


図-17 係数 β と D_{10} の関係

表-4 VGモデルのパラメータ

岩種	粒度番号	最大粒径 D_{max} (mm)	θ_{r24}	飽和体積含水率 θ_s	飽和透水係数 k_s (m/s)	パラメータ	
						α (1/kPa)	β
頁岩	S-b	100.0	0.037	0.22	1.71E-3	—	—
	S-c	50.8	0.046		5.24E-4	16.7	1.94
	S-d	25.4	0.054		2.16E-4	5.34	1.86
	S-e	9.52	0.066		—	1.17	1.75
花崗岩	G-b	100.0	0.041	0.22	2.14E-3	—	—
	G-c	50.8	0.049		1.52E-3	33.6	1.63
	G-d	25.4	0.058		3.51E-4	10.8	1.61
	G-e	9.52	0.068		—	2.40	1.59

θ_{r24} : 24時間後残留体積含水率 (図-14より算定)

表-5 パラメータフィッティングにおける相関係数

岩種	粒度番号	相関係数 r
頁岩	S-c	0.96
	S-d	0.98
	S-e	0.94
花崗岩	G-c	0.97
	G-d	0.95
	G-e	0.89

験の結果を k_r (右軸) と S_e の関係にプロットし、式(6)による関係をJ字形で示している。表-4にVGモデルのパラメータ α 、 β および k_s を示す。

表-5は、 $\psi \sim S_e$ 関係のフィッティングの相関係数を示している。図-15に示す比較的細粒のS-eやG-eの $\psi \sim S_e$ 関係は、乾燥側で試験値とのずれが認められるが、これらの試料の相関係数はやや小さくなっている。一方、粒径の大きい、S-c、S-d、G-c、G-dの試料の $\psi \sim S_e$ 関係はVGモデルで精度良く表せている。これに対して、このフィッティングにより求めた β を用いた $k_r \sim S_e$ 関係は、いずれの試料においても試験結果とずれが認められ、VGモデルは k_r を過小評価することがわかる。

図-16、図-17は、VGモデルのパラメータ α 、 β と D_{10} の関係を示している。両対数軸で表す α と D_{10} の関係および β と D_{10} の関係には相関があり、 D_{10} に対して α および β は直線の関係で表せることがわかる。ここで、 D_{10} で整理したのは、前出の図-14と同様の理由による。

図-18は、図-13を $k_r \sim S_e$ 関係で表し、式(7)の関係を実線で示したものである。この近似式は Irmay 型と称される式で、Irmay²¹⁾ は S_e の指数項 η の値を理論的に3と導いている。実験に用いた粗粒材の $k_r \sim S_e$ 関係

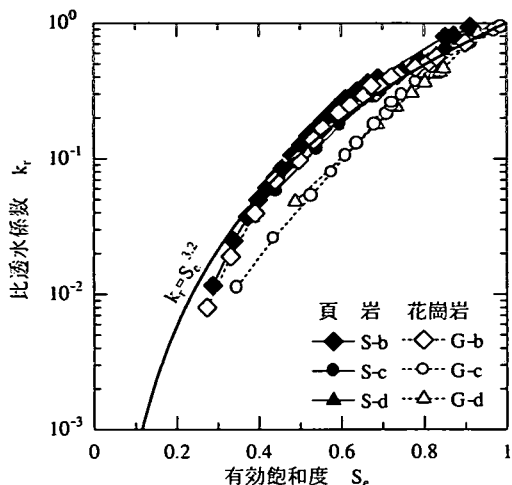


図-18 k_r と S_e の関係 ($n=0.22$)

は $n=3.2$ として、この式で良く近似できることがわかる。

$$k_r = S_e^\eta \quad (\eta=3.2) \quad (7)$$

図-15 と図-18 から粗粒材の $k_r \sim S_e$ 関係は、VG モデルよりも式 (7) の Irmay 型の式の方がその特性をうまく表せることがわかる。粗粒材の $k_r \sim S_e$ 関係が VG モデルでうまく表せないのは、このモデルが粘性土や砂などの細粒の試料の試験に基づいている¹⁴⁾ ことによるものと考えられる。

5. 結論

ロック材のような粗粒材料の不飽和浸透特性を把握するために、粗粒材用の試験機を試作して、頁岩と花崗岩の実粒度の相似粒度試料を用いて、粒径をパラメータとして、水分保持特性試験および不飽和透水試験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 粗粒材の水分保持特性は、体積含水率 θ に対応する土中水のポテンシャル ψ がきわめて 0 に近く、毛管上昇高さは数 cm であることを示した。また、岩種と粒度を変えた一連の試験から、粗粒材の水分保持特性は粒度分布の影響を受けることを確認した。
- 2) 土柱法と凍結法による粗粒材の水分特性曲線の比較から、細粒分を多く含む試料では、水分特性曲線は凍結の影響を受けることがわかった。また、粒径が大きくなるほどその影響は相対的に小さくなるが、 D_{max} が 50.8mm の試料であってもなお凍結の影響があることを示した。しかし、凍結法は供試体を自在の

厚さに切ることができ、粒径の大きな試料にも利用できるという利点があることから、凍結の影響を受けにくい粒度、例えば D_{max} が 100mm を越えるような試料では、土柱法を凍結法で代用できる可能性を示した。

- 3) 粗粒材の不飽和透水係数 k_{rs} は、土柱の上部から一定流量を供給し、定常状態の供試体の質量と流出流量を測定するという簡単な方法で、精度よく測定できることを示した。
- 4) 不飽和透水試験において、供試体上面に与える給水流量を増加させる方法では飽和に近い領域の k_{rs} の測定が難しいが、試料に炭酸ガスを混入する方法と飽和状態から給水流量を減少させるという簡単な方法を併用することで、広範囲の含水状態における k_{rs} の測定が可能となることを示した。
- 5) 粘性土や砂質土に多く適用されている VG モデルは、今回の試験に用いた粒度の範囲にある粗粒材の $\psi \sim S_e$ 関係には適用できるが、 $k_r \sim S_e$ 関係では k_r を過小評価することを示した。また、VG モデルの係数 α および β と D_{10} との関係は、両対数軸上でほぼ直線で近似されることを示した。
- 6) 岩種と粒度分布を変えた一連の不飽和透水試験から、粗粒材の $k_r \sim S_e$ 関係は、試験した岩種や粒径の範囲では、粒度や岩種にかかわらず、Irmay 型の式でよく近似できることを示した。
- 7) VG モデルや Irmay 型の式の不飽和浸透特性は S_e の関数としてあらわされているが、 S_e の算定に必要な粗粒材の 24 時間後残留体積含水率 $\theta_{r,24} \doteq \theta_r$ は、 D_{10} の対数に対してほぼ直線で近似できること、この結果を用いることで、さらに粗粒な試料の $\theta_{r,24}$ も推定できることを示した。

本論文では、ロック材のような、良好な粒度分布を持つ粗粒材の水分保持特性と不飽和透水係数について、主に、その試験法と粒度の影響について検討してきたが、精度が高いと考えた凍結法は、水分保持特性に影響を与えることが明らかとなった。しかし、今回の試験では、凍結の方法、例えば凍結するまでの時間や凍結の進行方向などが、含水比の分布にどのような影響を与えるのかといったことや土柱法において試料掘出し時の水面付近の乱れが、含水比にどの程度影響を与えるのかといったことまでは踏み込めなかった。また、水分保持特性と不飽和透水係数は、 D_{10} などの試料粒度と相関を持つことを示したが、それらの関係をさらに大きな実粒度まで外挿することの妥当性についてもモデル試験等による確認が考えられたが実現できなかった。これらについては、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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 向上拓美, 北村孝海: 浸透流における不飽和特性と解析精度に関する考察, 間組研究年報, pp. 163-174, 1986.
- 3) 工藤アキヒコ, 西垣誠, 西方卯佐男, 鳥居剛, 浅田昌蔵: 粗粒材の飽和透水特性に関する実験的研究, 土木学会論文集, NO. 715/Ⅲ-60, pp. 187-199, 2002.
- 4) 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.
- 5) 山口晴幸, 日比野忠史: 各種地盤材料の毛管および不飽和浸透特性, 土と基礎, vol. 37, No. 6, pp. 49-55, 1989.
- 6) Roy, M., Cote, J., Konrad, J.M. and Rorert, C.: Characterization of unsaturated granular bases for drainage consideration during spring thaw, *INB International Symposium on Thin Pavement, Surface Treatments and Unbound Roads*, Edited by Douglas, R. A. and Woodside, A. R., pp. 229-236, 1997.
- 7) 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), 地盤工学会, 2000.
- 8) 河野伊一郎, 西垣誠: 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 307 号, pp. 59-69, 1981.
- 9) 西垣誠, 楠見和紀: 不飽和土の浸透特性の評価に関する考察, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 179-186, 1987.
- 10) 河西基, 田中靖治, 駒田広也, 塩崎功: 不飽和浸透特性に関する基礎的検討, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 245-252, 1987.
- 11) 河田孝志, 国見宏, 河野伊一郎, 西垣誠: 滞水砂質地山におけるトンネル切羽の安定性について, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 365-370, 1987.
- 12) 塩沢昌, 井本博美, 中野政詩: フラックス制御定常流による不飽和透水係数の測定, 農業土木学会誌, 第 55 巻, 第 9 号, pp. 23-28, 1987.
- 13) 宇野尚雄, 佐藤健, 柘植浩史: 2, 3 の砂質土の水分保持特性, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, pp. 187-192, 1987.
- 14) Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Sci. Am. J.*, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 15) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, vol. 12, pp. 513-522, 1976.
- 16) Bresler, E., Russo, D. and Miller, R. D.: Rapid estimate of unsaturated hydraulic conductivity function, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 42, pp. 170-172, 1987.
- 17) Rogowski, A. S.: Watershed physics; model of the soil moisture characteristic, *Water Persa. res.*, Vol. 7, pp. 1575-1582, 1971.
- 18) Polubarinova-Kochina, p. Ya: The Theory of Ground Water Movement, Princeton univ. Press, p. 19, 1962.
- 19) 地盤工学ハンドブック改訂編集委員会: 地盤工学ハンドブック, 地盤工学会, p. 55, 1982.
- 20) Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. and Yates, S. R.: The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA/600/2-91/065, 1991.
- 21) Irmay, s.: On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 35 (3), pp. 463-467, 1954.

(2002. 7. 24 受付)

UNSATURATED HYDRAULIC PROPERTIES OF ROCKFILL MATERIALS AND THE EFFECT OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON SUCH PROPERTIES

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

In order to determine the effect of grain size distribution on the unsaturated hydraulic properties of rockfill dam material, a series of large-scale laboratory tests have been conducted by using well graded samples with similar grain characteristics. The experimental results show that (1) the water retention characteristic curve of coarse granular material can be obtained precisely by using the Column method, (2) the unsaturated permeability coefficient can be obtained by establishing a steady state of the sample-mass, in maintaining a constant water flux on top of the soil column, and (3) the Van Genuchten model, which predicts very well the water retention curve of porous materials, do not apply to unsaturated permeability coefficient of such materials. Rather, the Irmay model predicts well the unsaturated permeability coefficient of such materials.