ポーラスアスファルト混合物の不飽和浸透特性

矢野 隆夫¹・西山 哲²・中島 伸一郎³・森石 一志⁴・大西 有三⁵

¹正会員 京都大学大学院技術専門員 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: yano@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 山口大学大学院助教 理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 大林道路(株) 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁵正会員 京都大学理事・副学長 (〒605-8501 京都市左京区吉田本町)

透水性舗装の貯留・浸透特性を精緻に評価するためには、舗装を構成する各材料の保水特性と透水特性を把握しておくことが必要不可欠である。本研究では、ポーラスアスファルト混合物の保水・透水特性を明らかにすることを目的として、それらの特性に影響を与えると考えられる供試体の最大粒径、空隙率および厚さを変えた直径 $\phi=150\text{mm}$ のポーラスアスファルト混合物供試体に対して、水分保持特性試験と飽和・不飽和透水試験を実施した。その結果、水分保持特性はVan Genuchten式で、不飽和浸透特性はIrmay式でよく表現できることを示した。

Key Words : permeable pavement, saturated-unsaturated hydraulic properties, porous asphalt mixture, van Genuchten model, Irmay model

1. はじめに

都市部においてヒートアイランド現象との関連性も指摘されている局所的な集中豪雨は地下鉄、地下街などの地下空間への浸水や、鉄道、道路などの交通機関麻痺など大きな被害をもたらす可能性があるため、長年にわたって様々な対策が施されてきた。しかし、市街化の著しく進展した地域においては、土地利用などの制約から調整池の新設や河道の拡幅などの対策が難しいのが現状である。そのため、近年では、都市部において水害の要因となりうるような土地開発を行なう際には、雨水を貯留・浸透する施設を設置することにより、土地からの雨水流出量が開発前後で増加しないことを保証することが求められるようになってきている¹⁾。道路建設もこの規制の範疇であり、道路開発における対応策のひとつとして、車道への透水性舗装の適用が挙げられる。

透水性舗装は従来の密粒度舗装とは異なり、雨水が舗装を通じて原地盤へ浸透する。そのため、豪雨時に雨水流出量を抑える貯留浸透施設としての効果が期待されており、現在各地で試験的に透水性舗装が施工され、実路への導入が試みられている^{2)~6)}。しかしながら現在のところ、透水性舗装の研究は鎌田ら⁷⁾や吉中ら⁸⁾などの研究にみられるように透水性舗装の弱点である路盤材料や路床の耐久性の検討に重点を置かれた形でなされおり、透

水性舗装の長所である貯留・浸透特性に関しては十分に議論がなされていないのが実状である。

一般に透水性舗装は、従来の舗装の構造設計手法により構成と層厚を仮設定した後、想定する降雨条件に対して水収支計算を行い、要求性能（雨水流出抑制性能）を満足するかどうかを照査して、必要に応じて構造・材料・層厚を修正して最終的な断面を決定する。水収支に関する最もシンプルなモデルは、舗装を単なる空隙貯留槽、路床面を浸透面と考えて、貯留槽に貯まった雨水が路床土の透水性能と貯水位（水頭）に応じて浸透すると考えるモデルである。換言すると、ポーラスアスファルト混合物（以下、ポーラスアスコンと称す）も粒状路盤材も、路床土に比べれば格段に透水性が高いため、路面から浸透した雨水は時間を要さずにただちに湛水面に達するものとみなせることから、ポーラスアスコンと粒状路盤の浸透特性は計算上で考慮する必要がないとする方法であり、土木研究所による透水性舗装の水収支計算手法⁹⁾もこのモデルに基づいている。ところが、この水収支モデルは比較的穏やかな雨に対しては成立するものの、非常に強い降雨の場合には成立しない場合があることが指摘されている。これは、急激かつ高強度の降雨に対しては、舗装の貯留浸透処理が追いつかず、水収支計算上の貯留容量限界および浸透能力に達していないにもかかわらず、路面に溢流してしまう現象である。著者らは、

図-1 降雨強度 R_c と水面発生時間 t_m の関係

大阪府枚方市にある国土交通省近畿技術事務所の構内において、実物大透水性モデル舗装を構築¹⁰⁾して、降雨条件を変えた散水実験を行い、透水性舗装の浸透メカニズムの解明を試みた。図-1は降雨強度 R_c と水面発生時間 t_m の関係である。 t_m とは図に示す水位管に水面が現れた時の時間であり、水位管挿入位置が飽和状態になったと考える。この図からは、 R_c が弱い場合は底部から順番に水面が発生するものの、 R_c が強くなると中心部（水位管・中）が飽和するよりも先に舗装上部（水位管・上）が飽和し、その後に中心部に水面が表れる現象が見てとれる。このことから、 R_c の違いによって、舗装内で不飽和領域が発生することで水収支（溢流量、貯留量など）や溢流開始時間が変化することを指摘した。このような現象は舗装の不飽和浸透特性が大きく絡んでいる。不飽和状態での透水性能は飽和状態での透水性能よりも劣ること、または、突発的な豪雨には舗装空隙内の空気が封入されて抜け出すことができないことなどが原因である。以上のような強降雨時における透水性舗装の貯留浸透現象を考慮した水収支モデルを構築するためには、飽和-不飽和浸透流解析や、舗装体内の気液の挙動を表現可能な気液二相流解析¹¹⁾による数値解析的な検討が不可欠である。

地盤分野では、長年にわたって雨水の不飽和浸透現象のメカニズムを解明しようとする研究¹²⁾が広く行われてきた。しかし、課題としては、不飽和領域における水の挙動を示すパラメータである水分保持特性（図-9 参照）および比透水係数を求める必要があり、従来からその特性を求めるための計測手法が提案されてきた。水分保持特性および比透水係数を求めるための計測手法として、西垣ら¹³⁾は不飽和浸透特性を迅速に計測する室内試験方法として、非定常法による加圧板法および土柱法を行い、逆解析手法を用いて不飽和浸透特性の関数モデルの同定を行う方法を提案している。しかし既往の研究では、工藤ら¹⁴⁾により、ロックフィルダムに用いるような粗粒材を対象とした研究は行われているものの、ポーラスアスコンを対象とした研究は非常に少ない。著者らは参考文献 11)において、工藤ら¹⁴⁾の実験結果を参考にし

てポーラスアスコンの不飽和浸透特性を設定したが、ポーラスアスコンは骨材をアスファルトで固めているために濡れ性などが異なり、粗粒材とは違う特性を示す可能性があり、工藤ら¹⁴⁾の特性曲線を直接用いることは適切でないと考えられる。よって、飽和-不飽和浸透流解析などで透水性舗装の雨水浸透現象を正確に見積もるためには、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性を的確に把握しなければならない。

このような状況を鑑みて本研究では、不飽和領域も含めた透水性舗装の水収支計算を実施するための基礎データとして、ポーラスアスコンの水分保持特性および不飽和透水特性を実験的に明らかにすることを目的とした。そのため、ポーラスアスコンに適用可能な水分保持特性試験装置および飽和-不飽和透水試験装置を作製し、骨材粒径、空隙率および供試体寸法をパラメータとして水分保持特性試験と飽和-不飽和透水試験を実施し、実験から得られたパラメータが保水・浸透特性に及ぼす影響を考察した。したがって、本研究より得られたポーラスアスコンの不飽和パラメータおよび路盤・路床材の不飽和パラメータを使用して飽和-不飽和浸透流解析等を実施することにより、不飽和領域も含めた透水性舗装の水収支計算を行うことが可能となる。よって、急激かつ高強度な豪雨に対しても透水性舗装の治水効果をより現実に近い形で評価できるようになるため、治水安全度の高い透水性舗装を設計することが可能となると考えられる。

2. 供試体および試験装置

(1) 供試体

ポーラスアスコンの水分保持特性および飽和-不飽和透水特性は、空隙の量と大きさ（空隙径）に支配される。空隙の量とは、すなわち空隙率 n であり、空隙径は骨材の最大粒径 D_{max} に依存する。したがって、本研究では D_{max} と n を実験パラメータとした。

一般に、透水性舗装のポーラスアスコンは、透水性の確保と力学的耐久性の確保とのバランスから、目標空隙率を 20% とし、 D_{max} については、13mm もしくは 20mm が使用されることが多い¹⁵⁾。そこで本研究では、これらの一般値をベースにして、パラメータの値を上下に振ることとし、 D_{max} については、8mm, 13mm, 20mm とし、 n については、17%~24% とした。ただし、 $n=24\%$ という値は、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性に及ぼす空隙率の影響を調べるために設定した値であって、この空隙率を有するポーラスアスコンが現実的であるかどうかは議論の対象としない。また、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性は供試体厚 T に大きく影響を受けると考えられ、 T の影響を把握することは重要な問題となる。本研究で

表-1 ポーラスアスファルト混合物の配合および性状

項 目	ポーラス(8)	ポーラス(13)-17	ポーラス(13) ポーラス(13)-20	ポーラス(13)-24	ポーラス(20)
骨材配合率 (%)	5号砕石	—	—	—	25.0
	6号砕石	82.0(8~5mm)	81.5	86.5	87.0
	7号砕石	—	—	—	10.0
	スクリーニングス	—	—	—	—
	細砂	13.0	13.5	8.5	8.0
	石粉	5.0	5.0	5.0	5.0
アスファルト量(%)		5.2	5.2	4.9	4.2
使用アスファルト		ポリマー改質アスファルトH型			
通過質量百分率 (%)	26.5mm	—	—	—	100.0
	19	—	100.0	100.0	96.5
	13.2	—	96.1	95.8	96.2
	9.5	100.0	60.6	58.2	67.7
	4.75	31.2	20.5	15.6	15.0
	2.36	17.9	19.0	14.3	12.9
	1.18	—	—	—	—
	0.6	16.2	14.1	10.7	5.0
	0.3	14.0	8.8	7.4	5.0
	0.15	6.4	5.8	5.5	4.8
	0.075	4.1	4.5	4.3	3.9
	0.075	4.1	4.5	4.3	3.9
混合物の性状	密度(g/cm ³)	1.995	2.057	1.992	1.908
	理論密度(g/cm ³)	2.494	2.474	2.484	2.511
	空隙率(%)	19.2	16.9	19.8	24.0
	安定度(kN)	5.9	8.0	5.4	7.1
	フロー値(1/100cm)	36.5	49.0	36.0	96.5
	残留安定度(%)	—	86.0	96.3	—
	DS(回/mm)	5489	9000	7292	7000
	飽和透水係数(cm/s)	4.05×10 ⁻¹	3.36×10 ⁻¹	5.89×10 ⁻¹	1.09~1.31

図-2 ポーラスアスファルト混合物の合成粒度

用いた供試体の種類を整理すると以下のようになる。

- (1) D_{max} の違いが水分保持特性および飽和・不飽和透水特性に与える影響を明らかにするため、 D_{max} が 8mm で $n=20\%$ 、 $T=150\text{mm}$ の供試体（以下、ポーラス(8-20-150)と称す）、 n および T が同じで、 D_{max} が 13mm の供試体（ポーラス(13-20-150)）、 D_{max} が 20mm の供試体（ポーラス(20-20-150)）を作製した。
- (2) n の違いが不飽和浸透特性に与える影響を検討するため、上記のポーラス(13-20-150)の n が 20%であるのに対し、 n が 17%および 24%の供試体を作製した。

それぞれをポーラス(13-17-150)、ポーラス(13-24-150)と呼ぶことにする。

- (3) T が不飽和浸透特性に及ぼす影響を解明するため、 D_{max} が 13mm、 $n=24\%$ で $T=30\text{mm}$ （ポーラス(13-24-30)）、50mm（ポーラス(13-24-50)）、70mm（ポーラス(13-24-70)）および 100mm（ポーラス(13-24-100)）に変えた供試体を作製した。

なお、供試体は所定の寸法および空隙率を確保するため、ジャイレトリーコンパクタを使用して、直径 $\phi=150\text{mm}$ の供試体を作製した。作製条件は舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕B007、ジャイレトリー試験機によるアスファルト混合物の締固め試験方法¹⁶⁾に準拠した。ポーラスアスコンの配合および性状を表-1に示し、合成粒度を図-2に示す。

ポーラスアスコンの n はマーシャル試験において密度と理論密度により算出される。 n は透水特性などの指標となるが、同じ n を有する混合物であっても透水係数などが異なる場合がある。これは図-3に示すように、その空隙中に透水特性に寄与しない無効空隙が存在するためであるとされており、その特性を正確に把握するには有効空隙と半有効空隙を足し合わせた連続空隙率によって評価する必要がある¹⁷⁾。よって、本研究では有効空隙率 n_e として連続空隙率を用いることにした。なお、有効空隙率の測定は舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕B011、連続空隙率測定方法¹⁷⁾に準拠し、供試体作製後に行った。

図-3 ポーラスアスファルト混合物の空隙の概念¹⁷⁾

図-4 水分保持特性試験装置

図-5 水分保持特性試験の計測原理

(2) 水分保持特性試験

a) 試験装置と試験手順

地盤材料の保水性を測定する方法には土中法、吸引法および加圧法など多くの手法が提案されている¹⁸⁾。その中でも土中法が一般的であり、その方法は輪切り円筒カラムを重ね合わせたモールド内に飽和土柱を作製し、土

中下部から試料内の水を排水し、定常に達した後各カラムの含水比を測定する方法¹⁹⁾である。しかし、本研究で対象としている供試体は骨材がアスファルトで固められているため、輪切りにすることは困難であり、この方法を適用することは適切ではない。そのため、本研究ではこれらの方法の中でも、圧力の測定範囲が広く、低い吸引圧まで測定可能である吸引法（水頭法、以下、吸引法と称す）と加圧法を併用した方法を用いることにした。このように、吸引法と加圧法を併用した方法を用いた理由として、著者らが以前実施した試験¹⁹⁾では加圧法のみで行っていた。その結果、加圧法では体積含水率の算定が難しく、なおかつ、全体的にマトリックポテンシャルが大きくなるという結果が得られた。また、加圧法のみでは低マトリックポテンシャルを発生させにくいという欠点があることから、本研究においては試験装置の改良（下流端水槽を可動式に変更等）および体積含水率の算出方法の検討を行った。

本研究で作製した水分保持特性試験装置を図-4に示し、計測原理を図-5に示す。吸引法は図-5に示すように下流端水槽の水頭を変化させることにより、供試体内に高低差 h の水頭差を与え、その h の 1/2 をマトリックポテンシャル ψ （サクシオン）として水分保持特性を求める方法である。しかし、吸引法では水頭差を与えるのに限界がある（本装置では水頭差で約 30.0cm）。そこで、本装置では限界に達した後は加圧法に切り替えることにより、供試体に正の空気圧を負荷して平衡に達するまで排水させ、その時の供試体における体積含水率 θ と、負荷した空気圧の関係から水分保持特性を求める方法を採用した。

次に本装置の概略を述べる。

まず始めに、圧力容器内に供試体を設置し、ゴムスリーブを取り付けた後に空気圧を与える。供試体を設置する際に、図-4に示すメンブレンフィルタ（バブルポイント：完全に飽和したメンブレンフィルタを通して空気が出始める圧力 $\geq 0.096\text{MPa}$ ）を介して大気圧下の水と接触させる。このフィルタ材は「チャンバー内の空気を大気と不連続にする」という目的と「供試体内の間隙水压を大気圧下に置いた水の位置水頭と同様にする」という2つの目的を有している。フィルタ材が上記の2つの機能を発揮できるよう、ガラスフィルタとメンブレンフィルタを組み合わせた構造とした。

次に試験の手順を述べる。

- (1) 供試体を圧力容器内に設置した後、サクシオンポンプを用いて圧力容器内を減圧して供試体を完全に飽和させる。
- (2) レーザーレベルを用いて供試体上部と下流端水槽の水位を一致させる。
- (3) 側圧 (50kPa) をかけた後、供試体内の圧力を大気圧

に保つ。

- (4) (3)の状態が平衡状態に落ち着いたことを排水量によって確認する。その後、下流端水槽を所定の位置まで下げ h を与えた後、排出される水の量を電子秤で測定する。
 - (5) (4)の排水量が平衡状態になった事を確認して、下流端水槽をさらに下げ h を増加させる。
 - (6) 上記(4)と(5)の作業を最大の h まで繰返し行い、その後、加圧法に切り替える。
 - (7) 供試体内に空気を圧入し、排出される水の量を電子秤で測定する。
 - (8) (7)の排水量が平衡状態になった事を確認して、空気圧をさらに加圧させる。
 - (9) 以上の(7)と(8)の作業をフィルタ材が空気を圧入させることが不可能なバブルポイント内で繰返し行う。
- b) マトリックポテンシャル ψ および体積含水率 θ の算出方法

前述したように吸引法は図-5 に示すように下流端水槽を変化させることにより、供試体内に高低差 h の水頭差を与え、その h で ψ および θ を求める方法であり、 ψ は供試体中央と下流端水槽の水位、 θ は供試体上部から下流端水槽の水位までの距離 h から以下のように求められる。

(1) 水頭差のみで供試体内に ψ を与える場合

[a] 下流端水槽の水位が供試体内にある場合 ($h \leq T$)

$$\psi = \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$\theta = \frac{Ahn_e - \Delta V}{Ah} \quad (2)$$

ここに、 A は供試体の断面積、 n_e は有効空隙率であり、 ΔV は排水量の総和である。

[b] 下流端水槽の水位が供試体底面より低い位置にある場合 ($h > T$)

$$\psi = T - h \quad (3)$$

$$\theta = \frac{ATn_e - \Delta V}{AT} \quad (4)$$

(2) 水頭差で ψ を与えるのが限界に達した後、供試体に正の空気圧を負荷する場合

$$\psi = \frac{p}{\rho g} + T - h \quad (5)$$

図-6 飽和-不飽和透水試験装置

ここに、 p は供試体内に作用させた空気圧、 ρ は水の密度であり、 g は重力加速度である。なお、 θ は式(4)で算出できる。

以上の原理に基づき、本装置の特徴を挙げると次のようになる。

- (1) 側圧を作用させるため、供試体とメンブレンフィルタの密着性が良い。
- (2) 供試体として D_{max} の大きなポーラスアスコンや路盤材を想定しているため、 $\phi=150\text{mm}$ という大きな円柱供試体で実験可能である。
- (3) 圧力円筒の高さを変えることで厚さが 300mm 程度の供試体での試験も可能である。
- (4) ペDESTAL およびキャップを取り替えることで $\phi=150\text{mm}$ 以外の大きさの供試体でも実験可能である。

(3) 飽和-不飽和透水試験

a) 試験装置と試験手順

本研究で使用した飽和-不飽和透水試験装置は、鉛直一次元カラムの上部から一定流量の水を供給した場合の定常時の供試体重量から θ を、流出流量から不飽和透水係数 k_{us} を求めるというフラックス制御法を用いたものである。

フラックス制御法とは、定常時の土中水の ψ と水フラックス（定常時の単位体積当たりの流出流量）、 k_{us} の間にダルシー則が成り立つものとする考え方である。また、フラックス制御法は不飽和状態で土中を流れる水の流速が、土中の水分量や土中水の ψ と関連していることに着目している。ヒステリシスを考えなければ、定常状態で流れる水の流速の大小により土中水の ψ が決まることに着目して ψ と k_{us} を求めるものである。また、フラックス制御法は、大きな水フラックスを与えることが可能であ

図-7 不飽和透水試験の模式図

図-8 不飽和透水試験の模式図

り、透水係数が大きな試料の測定に適している²⁰⁾ため、高い透水性を有するポーラスアスコンの測定に適していると考えられる。

飽和-不飽和透水試験装置は工藤らの実験方法¹⁴⁾を参考に図-6に示すようなものを作製した。給水装置として一定流量を供給するためにマリOTT瓶を用いた。また、給水ノズルを用いて供試体断面に均等に給水できる構造とした。なお、試験モールドは供試体のセットを容易にするため、縦方向に二つ割りモールドとした。

まず始めに不飽和透水試験の手順を述べる。

- (1) 体積含水率を正確に求めるためには供試体が絶乾状態にあることが必要不可欠である。そこで、各供試体は 60℃に設定した乾燥炉内で 2-3 日放置して乾燥させる。
- (2) 供試体を図-6(b)に示す不飽和透水試験装置にセットし、飽和度測定用電子秤に設置した後、試験開始時の総重量を計測する。なお、モールドと供試体間の通水を防ぐため、供試体上部にシリコングリスを塗布した。
- (3) 供試体上面にマリOTT瓶から一定流量の水を供給し、供試体重量および流出流量の経時変化を計測する。定常状態での供試体重量の増分から θ を、流出流量から k_{us} を算出する。

(4) 供試体重量および流出流量が定常となった時点でマリOTT瓶からの給水流量を増加させ、図-7に示すように供試体上面に水面が形成されるまで、換言すると、湛水が確認されるまで(3)、(4)の操作を繰り返す。

(5) 供試体上面に水面が形成された後、不飽和透水係数曲線のヒステリシスの有無を調べるため、給水流量を減少させて排水量が無くなるまで(5)の操作を繰り返す。

なお、本実験では図-8に示すように 2 日間に渡って、給水流量の増加・減少を 2 回繰り返してヒステリシスの有無を確認した。

次に飽和透水試験の手順を述べる。

- (1) 供試体を圧力釜内でサクシオンポンプを用いて完全に飽和させる。
- (2) 二つ割りモールド上に透水円筒カラーを設置し、図-6(a)に示すような飽和透水試験用に変更する。
- (3) 上部から水を供給し、飽和状態を保ちながら通水を行い、排水流量から飽和透水係数 k_s を算出する。この時、 k_s の動水勾配依存性を調べるため、水頭差 H を変えて試験を行う。なお、 H はレーザーレベルを用いて計測した。

b) 不飽和透水係数 k_{us} の算出方法

鉛直一次元カラムの試験において、一定流量の水を供試体上面に供給し、流出流量が定常状態になり、供試体全体の θ が給水流量に応じて様な状態になると仮定すると、鉛直一次元浸透の基礎式は次式で表される。

$$q = k_{us} A \left\{ \frac{\partial(\psi/\gamma_w)}{\partial z} + 1 \right\} \quad (6)$$

ここに、 q は定常時の単位体積当たりの流出流量、 A は供試体断面積であり、 ψ は土中水のポテンシャル、 γ_w は土中水の単位体積重量である。

定常状態では供試体内の θ は一定(ψ もほぼ一定)になると仮定できるため、式(6)の $\{ \}$ 内の $\partial(\psi/\gamma_w)$ はゼロとなる。よって、動水勾配は 1 となり、 k_{us} は式(6)から次式で求められる。

$$k_{us} = \frac{q}{A} \quad (7)$$

また、 θ は供試体重量の変化から、

$$\theta = \frac{m_i - m_0}{\rho_w V} \quad (8)$$

図-9 水分保持特性

と求められる．ここに、 m_i は定常状態での供試体重量、 m_0 は供試体の乾燥重量、 V は供試体体積であり、 ρ_w は水の密度である．

3. 試験結果

従来、多くの研究者により不飽和浸透流の関数モデルが提案されているが、本研究ではその関数モデルとして、Van Genuchten 式²¹⁾と Imray 式²²⁾を用いることにする．

Van Genuchten は不飽和浸透特性の関数モデルとして以下の式を提案している．

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + |\alpha_v \phi|^\beta} \right]^{-\lambda} \quad (9)$$

$$\lambda = 1 - \frac{1}{\beta_v} \quad (10)$$

$$k_{us} = k_s S_e^{1/2} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/2} \right)^2 \right\}^b \quad (11)$$

ここに、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小含水量、 ϕ は圧力水頭であり、 α_v 、 β は土の種類などにより決定される定数である．

また、比透水係数 k_r は次式で与えられる．

$$k_r = \frac{k_{us}}{k_s} \quad (12)$$

図-9 に示す水分保持特性曲線において、未知パラメータは k_s 、 k_{us} 、 α_v 、 β および θ_r 、 θ_s であるが、 k_s は飽和透水試験、 θ_s は供試体の初期状態から与えられるものであ

る．

Van Genuchten 式（以下、VG 式と称す）は飽和—不飽和浸透解析に広く用いられており、水分保持特性試験で得られた計測値を式(9)でフィッティングして α_v 、 β を決定し、式(11)で k_{us} を求めるものである．なお、 α_v は水分保持特性曲線の保水力の強さを表しており、 β は曲線の中間、すなわち、図-9 に示す傾き C （比水分容量）を決定するパラメータである．

Imray は粒状体の骨格構造モデルから理論的に導かれた、次式を提案している．

$$k_r = \frac{k_{us}}{k_s} = S_e^{\alpha_e} \quad (13)$$

ここに、 α_e は不飽和透水試験により得られたデータを指数近似して得られる定数である．

一般に不飽和浸透特性は比透水係数 k_r で評価される．そのため、飽和透水係数を求めることは必要不可欠である．定水位透水試験において、ダルシー則は層流状態の浸透流に適用されるが、礫材などの大粒径ではほとんどの場合で乱流状態にあるためダルシー則を適用することは不可能であり、層流と乱流の境界の動水勾配は粒径が 12.7~15.9mm で 10^2 、0.8~2.4mm で 10^1 程度であるとされている²³⁾．そこで、その問題を解決する方法として、 T を厚くすることで動水勾配を小さくして定水位透水試験を行うことや、低動水勾配下での変水位透水試験が提案されている²³⁾．しかし、本研究で用いた供試体では作製する高さに限界（最大で 250.0mm 程度）があり、なおかつ、試験装置が低動水勾配（水頭差 H が最小で 4.0cm 程度）に対応していないために乱流状態での試験をせざるを得ない状態である．また、透水性舗装の浸透現象は雨水の自由落下であり、求めたいのは動水勾配 $i=1.0$ での挙動であることから、本研究では、 $i=1.0$ の飽和透水係数を求めることとした．

ここではまず始めに k_s の動水勾配依存性を述べる．

図-10 に i と k_s の関係を示す．この図からは、 i が大きくなるほど k_s は小さくなる傾向があり、動水勾配の依存性が認められる．これは乱流状態での試験が影響しているものと推察される．しかし、その関係は指数関数的であることから i が 1 での k_s を求めることが可能である．

図-11、表-2 に $i=1.0$ の飽和透水係数を示す．なお、表-2 には後述する最小含水量 θ_r などの計算値も示してあるので、当該個所での論説に際しては表-2 を参照されたい．図-11 は n_e と $i=1.0$ の k_s を示したものであり、その関係は累乗関数で近似でき、 n_e が支配的なパラメータであることが分かる．

次に、不飽和透水試験において、フラックス制御法を適用する場合、 θ と k_{us} の関係でヒステリシスの有無を確

図-10 動水勾配 i と飽和透水係数 k_s (a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響

図-11 有効空隙率 n_e と飽和透水係数 k_s

認することが重要である。図-12 は θ と k_{ss} の関係を示したものであり、図-8 に示すように往路(1)～復路(1)は絶乾状態から給水を、往路(2)～復路(2)は湿潤状態から給水を行ったものである。この図から、往路(1)の θ の小さい領域においては同一の θ で比較すると、 k_{ss} は大きな値を示すものの、一旦湿潤してしまえばほぼ同一経路を辿ることが分かる。なお、すべての供試体とも同様の傾向を示していることを付記しておく。よって、本研究では同じ経路を辿る復路(1)、往路(2)および復路(2)のデータで不

飽和浸透特性を議論する。

(1) 水分保持特性試験結果

図-13 は水分保持特性試験結果に VG 式をフィッティングした結果である。なお、計測値とのフィッティングには Van Genuchten らが提案したプログラム RETC²⁴⁾を簡素化した竹下、河野²⁵⁾のプログラムを使用した。図-13(a)の D_{max} を変えた試験結果からは、 θ が大きい領域では飽和体積含水率 θ_s のばらつきによる影響が見られるものの、 θ 付近ではほぼ同じ経路を推移しており、VG 式の適用性も良いことが明らかである。図-13(b)の n を変化した結果からは、 θ が大きい領域では $\theta_s (=n_s)$ の違いが表れているのに対し、 θ が小さい領域 (θ 付近) ではほぼ同じ値となっており、VG 式の適用性も良いことが分かる。また、図-13(c)に示すように、 T を変えた試験結果に関しては、 T が厚くなるに従い保水力も大きくなる傾向が認められるが、 θ 付近ではほぼ同じ値を示しており、VG 式に関してもよく適用していることが明らかである。以上の事から、ポーラスアスコンの水分保持特性は θ_s に依存されること、また、VG 式で精度よく表現できることが分かる。

図-14 は D_{max} などのパラメータ別に式(9)から求められるパラメータ α_v 、 β_s をプロットしたものである。この図から α_v に関して、図-14(a)の D_{max} の影響については、データ数が少なく相関を判断するのは困難であるが、 D_{max} が大きくなるにしたがって α_v が増加する傾向にある。それに対し、図-14(b)の n_e の影響については n_e が大きくなると α_v も大きくなる傾向がある。図-14(c)の T の影響に関しては、ポーラス(13-24-100)を除いて指数近似した結果においても、 T が大きくなるとともに α_v も大きくなる傾向が認められる。また、 β_s に関しては若干の傾きがあるものの、すべてのパラメータとも 2.0 程度の値を示しており、 D_{max} などのパラメータに影響されないことが分かる。

以上に結果を踏まえて、ここからはすべての供試体の共通のパラメータであり、なおかつ、透水特性に最も影響を及ぼすと考えられる n_e に注目して議論を進める。

図-15 は全供試体の n_e と α_v および β_s をプロットしたものである。 α_v に着目すると、 n_e が大きくなるに従って α_v も大きくなっており、このことは n_e が大きくなると保水力が低下することを意味している。それに対して β_s は n_e に相関性がないものの、全供試体ともほぼ同程度の値 (平均値=2.001, 標準偏差=0.044) を示しており、ポーラスアスコンの比水分容量 C は n_e に依存されないものと推察できる。

D_{max} などのパラメータ別に θ をプロットしたものを図-16 に示す。 θ とは、土の吸着水のように浸透によって移動し得ない体積含水率の値であり²⁶⁾、間隙空気圧を増

表-2 供試体の諸定数と計算結果

供試体名	厚さ $T(\text{cm})$	空隙率 $n(\%)$	有効空隙率 n_e , 飽和体積含水率 θ_s	最小含水量 θ_r	飽和透水係数 $k_s(\text{cm/s})$	VG式のパラメータ		限界毛管水頭 ψ_{cr} (cmH_2O)	Irmay式の パラメータ α_i
						α_v	β_v		
ポーラス(8-20-150)	15.008	19.2	0.156	0.0176	4.053×10^{-1}	0.821	2.066	3.212	2.572
ポーラス(13-17-150)	14.985	16.9	0.138	0.0300	3.356×10^{-1}	1.977	1.849	2.103	1.268
ポーラス(13-20-150)	15.007	19.8	0.175	0.0277	5.890×10^{-1}	1.935	2.046	2.176	1.668
ポーラス(13-24-30)	3.061	25.0	0.246	0.0313	1.313	2.847	1.969	0.734	2.916
ポーラス(13-24-50)	5.021	24.1	0.236	0.0539	1.101	2.296	1.984	1.211	2.737
ポーラス(13-24-70)	6.976	23.9	0.233	0.0342	1.179	2.664	1.859	0.801	2.391
ポーラス(13-24-100)	9.967	23.4	0.228	0.0356	1.089	4.754	1.900	1.733	1.188
ポーラス(13-24-150)	14.988	24.0	0.222	0.0293	1.113	2.997	2.072	2.483	2.069
ポーラス(20-20-150)	14.990	19.8	0.185	0.0257	6.388×10^{-1}	0.966	2.267	3.225	1.963

図-12 不飽和透水試験結果

加させても体積含水率が変化しない残留水分状態での含水量である。この図からは、 D_{max} の影響については D_{max} が大きくなるとともに θ_r も大きくなる傾向が認められる。 n_e の影響については θ_r はほぼ一定値を示しており、 T の影響については T が大きくなるとともに θ_r は小さくなる傾向が認められるが、その傾き（ポーラス(13-24-50)を除いて指数近似）は小さく、 T が θ_r に与える影響は少ないことが分かる。

図-17に n_e と θ_r の関係を示す。この図からは、 n_e が大きくなるに従って θ_r は増加する傾向が読み取れるが、図-13、図-16から、 θ_r はポーラス(8-20-150)とポーラス(13-24-50)を除けば約0.03付近にあることが明らかである。そこで、 θ_r は正規分布しているものと仮定して最大値（ポーラス(13-24-50)）、最小値（ポーラス(8-20-150)）を棄却できるかを確認するため、グラブス・スミルノフ検定²⁷⁾を試みた。その結果、最大値は有意水準2.5%で、最小値は有意水準10%で棄却できることが分かった。

よって、それらを除いた計測値で平均値を求めた結果、 θ_r は0.031（標準偏差=0.004）になり、 θ_r は D_{max} 、 n_e および T に左右されず、一義的に求まる可能性があることが分かる。また、西垣²⁸⁾によると、砂の θ_r は0.014~0.075程度であり、ポーラスアスコンの θ_r もこの範囲内にある。しかし、砂に比べて大きな空隙径を持つポーラスアスコンが砂と同等の保水力を有するかは疑問である。この原因として空隙構造の違いが考えられる。すなわち、図-3に示すようにポーラスアスコンには砂などの地盤材料にはない半有効空隙が存在するため、その空隙に水が貯留されるために θ_r が大きくなったものと推察される。よって、図-13に示す水分保持特性曲線においても、半有効空隙がなければ曲線は下方にシフトする可能性があるが、ポーラスアスコン独特の半有効空隙が存在する限り推論の域を脱し得ない。

次に限界毛管水頭 ψ_{cr} について述べる。 ψ_{cr} とは土の保水力を表す値であり、図-9に示す水分保持特性において、飽和状態の圧力水頭の直線部の値であり、土中内の圧力水頭がこの値以下になると排水を開始する点²⁹⁾である。この値を求める方法として、Brooksらの方法があり、彼らは図-18に示すように水分保持試験結果を両対数でプロットして $S_e=1.0$ での値より ψ_{cr} を求める方法を提案している。

図-19は D_{max} などのパラメータ別に ψ_{cr} をプロットしたものである。この図からは、 D_{max} の影響およびの n_e 影響については ψ_{cr} はほぼ一定値を示しているのに対し、 T の影響については T が大きくなるとともに ψ_{cr} は大きくなる傾向が認められる。

図-20にすべての供試体の T と ψ_{cr} の関係を示す。この図からは T が厚くなるに従って ψ_{cr} は増加しており、 ψ_{cr} にとって T が支配的なパラメータであることが分かる。しかし、その値は最大で3.0cm程度であり、西垣、楠見²⁹⁾

図-13 水分保持特性試験結果 (a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響

によると、砂の ψ_r は 10.0cm~30.0cm 程度であること、工藤ら¹⁴⁾からは粗粒材としての頁岩、花崗岩で 10.0cm 程度であることが示されており、これらの材質から比べるとポーラスアスコンは水分をほとんど保持しないことが明らかである。

(2) 不飽和透水試験結果

図-21 は不飽和透水試験結果を VG 式でフィッティングした結果である。図-21(a)の D_{max} を変えた試験結果か

図-14 VG 式のパラメータ α_v , β_v ((a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響)

図-15 VG 式のパラメータ α_v , β_v

図-16 最小含水量 q_r の指数近似結果

らは、計測値にばらつきが見られる。これは q_r のばらつきによる影響と考えられる。また、VG 式は実験値より大きく乖離しており、VG 式は k_{rs} を過小評価する可能性があることが、なおかつ、その経路も大きく異なってい

 図-17 有効空隙率 n_e と最小含水量 $\theta_{\min}$

 図-19 限界毛管水頭 ψ_{cr} の指数近似結果

 図-20 供試体厚 T と限界毛管水頭 ψ_{cr}

 図-18 マトリックポテンシャル ψ と有効飽和度 S_e ((a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響)

ることが明らかである。図-21(b)の n_e を変化させた結果からは、同じ θ で比較すると、 n_e が小さい方が大きな k_r を示しており、依存性が見て取れる。この原因は以下のように推察できる。同じ寸法の供試体において、 n_e が小さくなると、その供試体の空隙量は減少する。また、 θ が同じということは、供試体内に残存する水分量（水の体積）は同じであることから、水の体積と空隙の体積の比である飽和度は、空隙率が小さい方が大きくなる。よって、飽和度が大きくなるに従って k_{rs} も大きくなるということから、 k_r も大きくなるものと考えられる。VG 式の適用性に関しては、実験値より大きく乖離しており、VG 式は k_{rs} を過小評価することが明らかである。図-21(c)に示すように、 T を変えた試験結果からは、同じ k_r で比較すると、 T が厚いほど、 θ は小さくなる傾向があることが分かる。これは、本研究で用いた試験方法では供試体上部から給水するため、供試体は上部から逐次飽和するが、 T が厚くなるほど下部に行くに従って飽和度の上昇が鈍るため、下部に不均質な飽和領域が多く存在するようになり、式(6)で示したように供試体の θ が一様にならないままで排水量が平衡状態になったと推測される。よって、 k_{rs} を測定する場合は、 T をできる限り薄くし、供試体の θ を一様になるようにする方が良いと考えられる。VG 式の適用性は、 T が薄くなるに従って実験値との乖離も小さくなるものの、 k_{rs} を過小評価することが明

図-21 不飽和透水試験結果 ((a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響)

らかであり、その経路も大きく異なることが分かる。

以上の事から、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性はVG式で精度よく表現できないことが分かった。このことは、工藤ら¹⁴⁾が行った粗粒材を対象とした実験結果と同様であり、彼らは S_e と k_r の関係はImay式の方がその特性をうまく表せることを示した。また、その原因として、このモデルは粘性土や砂などの細粒の試料の試験に基づいていることを指摘している。よって、本研究でも

図-22 Imay式のフィッティング結果 ((a)最大粒径の影響, (b)空隙率の影響, (c)供試体厚の影響)

Imay式の適用性を検討した。

図-22はImay式のフィッティングした結果である。なお、フィッティングには図-12に示すように、比較的小さい領域では若干の乖離は認められ、その値を過大評価する可能性があるものの、図-21に示すVG式よりもその挙動はより良く表現されており、ポーラスアスコンにおい

図-23 Imayのパラメータ α の指数近似結果 図-24 Imay 式のパラメータ α

でも Imay 式の適用性の良好さを確認することができる。

図-23 は D_{max} などのパラメータ別に式(13)から求められるパラメータ α をプロットしたものである。この図からは、 D_{max} の影響については D_{max} が大きくなるに従って α は小さくなる傾向が認められる。 n_e の影響については n_e が大きくなるに従って α も大きくなり、 T の影響については T が大きくなるとともに α は小さくなる傾向があることが分かる。

図-24 は n_e と α をプロットしたものである。この図からは n_e が大きくなるに従っても α が大きくなっており、このことは n_e が大きくなるほど k_r が小さくなることを意味しており、不飽和浸透特性においても k_r と同様に n_e が支配的なパラメータであることが分かる。また、その値は最大で 2.9、最小で 1.1 程度であり、Imay²⁾によると 3.0 程度であること、工藤ら¹⁴⁾が行った粗粒材の頁岩、花崗岩で 3.2 程度であることから、これらの材質から比べると、ポーラスアスコンは同じ S_g で比較すると k_r は大きくなることを示している。これはアスファルトの濡れ性等が影響しているものと推測される。

4. 結論

透水性舗装に用いられるポーラスアスコンの不飽和浸

透特性を解明するため、作製条件を変えた供試体を準備し、水分保持特性試験ならびに飽和-不飽和透水試験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 本研究で実施した飽和透水試験では乱流状態下での実験であったが、飽和透水係数 k_s は有効空隙率 n_e と良い相関性があることが分かった。
- (2) 給水の増減を繰り返した不飽和透水試験を行った結果、体積含水率 θ と不飽和透水係数 k_{rs} の関係にはヒステリシスが無いことが確認できた。
- (3) ポーラスアスコンの水分保持特性は VG 式で精度よく表現できることを示し、その特性を決定するパラメータ α 、 β において、 α は n_e に支配的であるが、 β は全供試体ともほぼ同程度の値を示しており、ポーラスアスコンの比水分容量 C は n_e に依存されないことを明らかにした。
- (4) ポーラスアスコンの最小容水量 θ_r は最大粒径 D_{max} 、 n_e および供試体厚 T に左右されず、一義的に求まる可能性があることを示した。また、限界毛管水頭 ψ_g は最大で 3.0cm 程度であり、 T が支配的なパラメータであることを示した。
- (5) 不飽和透水試験において、比透水係数 k_r に供試体厚依存性があることが分かった。この原因は供試体の体積含水率の不均一性に起因していることを指摘した。
- (6) ポーラスアスコンの不飽和浸透特性は VG 式では明らかな乖離が認められ、なおかつ、 k_r を過小評価することが分かった。それに対し、Imay 式では、 k_r の低い領域では過大評価する可能性があるものの、VG 式よりもその挙動はより良く表現できることを明らかにした。
- (7) Imay 式において、不飽和浸透特性を決定するパラメータ α は n_e が支配的なパラメータであることを示した。

以上、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性について論じてきたが、ポーラスアスコンの不飽和浸透特性は粗粒材と異なることから、参考文献11)に示した結果は大きく変わる可能性がある。よって、今後は本研究で得られた結果を飽和-不飽和浸透解析などに適用し、透水性舗装の雨水浸透・貯留効果の解明を試みる予定である。

謝辞： 本研究に当たっては新都市社会技術融合創造研究会における実験データを使用しました。関係の方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省告示第 521 号：「特定都市河川浸水被害対策法」の概要、国土交通省、2004。
- 2) 森石一志、大西有三、西山 哲、矢野隆夫、山本 剛、

- 香川保徳：重交通道路に適用した透水性舗装の耐久性に関する一考察，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.276-284，2008.
- 3) 川西 寛，藤井則義：環境に配慮した舗装構造の技術開発－産業廃棄物を利用した，重交通に耐えうる全断面透水性舗装の構築－，舗装，Vol.33，No.2，pp.4-9，2001.
 - 4) 荒井 進，大川秀雄，田口 仁，大竹和彦：新潟市における車道透水性舗装の試み，舗装，Vol.33，No.3，pp.8-15，1998.
 - 5) 建部英博，大根義男，大谷大三：車道を対象とした透水性舗装の可能性，舗装，Vol.31，No.9，pp.27-31，1996.
 - 6) 上山二郎，浦上康文：車道透水性舗装，道路，Vol.636，pp.24-28，1994.
 - 7) 鎌田 修，清水忠昭，伊藤正秀：車道透水性舗装の耐久性に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.10，pp.91-98，2005.
 - 8) 吉中 保，根本信行，幸田正裕：透水性アスファルトの車道への適用に関する検討，土木学会舗装工学論文集，Vol.5，pp.47-52，2000.
 - 9) 独立行政法人土木研究所：道路路面雨水処理マニュアル(案)，pp.50-51，2005.
 - 10) 木下孝樹，和田 実，西山 哲，矢野隆夫：車道透水性舗装モデルの機能性評価－産・学・官の取組み－，舗装，Vol.41，No.5，pp.5-9，2006.
 - 11) 西山 哲，大西有三，矢野隆夫，北山迪也，和田 実：透水性舗装の雨水浸透機能に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.12，pp.99-106，2007.
 - 12) 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.
 - 13) 西垣 誠，竹下祐二，河野伊一郎：室内試験による不飽和浸透特性の非定常算定方法，土木学会論文集，No.454/III-20，pp.103-112，1992.
 - 14) 工藤アキヒコ，西垣 誠，西方卯佐男，鳥居 剛，浅田昌蔵：粗粒材の不飽和浸透特性の測定と粒度による影響，土木学会論文集，No.743/III-64，pp.77-87，2003.
 - 15) 社団法人日本道路協会：排水性舗装技術指針（案），pp.26-34，1996.
 - 16) 社団法人日本道路協会：ジャイレトリ－試験機によるアスファルト混合物の締固め試験方法，舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕，[3]-82，2007.
 - 17) 社団法人日本道路協会：連続空隙率測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕，[3]-117，2007.
 - 18) 地盤工学会：第2編 物理試験，第7章 土の保水試験，土質試験の方法と解説，pp.118-135，2006.
 - 19) 森石一志，大西有三，西山 哲，矢野隆夫，小関裕二：不飽和浸透特性を考慮した透水性舗装の透水性能に関する研究，土木学会舗装工学論文集，Vol.13，pp.63-70，2008.
 - 20) 社団法人地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価（訂正第2刷），pp.197-198，2006.
 - 21) Van Genuchten, M. Th. : A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
 - 22) Irmay, S. : On the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Trans. Amer. Geophys. Union*, Vol.35, No.3, pp.463-467, 1954.
 - 23) 社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一改訂版），pp.415-423，2005.
 - 24) 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. (<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?rien-van-genuchten>)
 - 25) 竹下祐二，河野伊一郎：不飽和浸透特性の推定方法とその適用について，地盤と建設，Vol.11，No.1，pp.95-113，1993.
 - 26) 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.
 - 27) 石原貞夫：統計解析のはなし，pp.254-256，東京図書，1992.
 - 28) 西垣 誠：飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2,3の考察，土質工学会論文報告集，Vol.23，No.3，pp.165-177，1983.
 - 29) 西垣 誠，楠見和紀：不飽和度の浸透特性の評価に関する考察，不飽和度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.

(2010.3.16 受付)

SATURATED - UNSATURATED HYDRAULIC PROPERTIES OF POROUS ASPHALT MIXTURE

Takao YANO, Satoshi NISHIYAMA, Shinichiro NAKASHIMA, Kazushi MORIISHI
and Yuzo OHNISHI

A permeable pavement, which is one of pavements with various advanced functions, has been expected to improve the urban environments by the pervious surface structures. Because we need to determine the water retention and permeability characteristics of pavement materials in order to evaluate the rainfall storage and infiltration facilities of the permeable pavement, we conducted a series of laboratory tests using porous asphalt mixture specimens having a diameter of 150mm which consist of several different kinds of maximum grain size, void ratio and specimen length. The experimental results show that the Van Genuchten model predicts the water retention curves and the Irmay model predicts the unsaturated permeability coefficients of such materials very well, respectively.