

(2) 埋立廃棄物層の浸透能の現位置測定

In situ Intake Rate Measurement for Determining Hydraulic Conductivity of Solid Waste Layers

東條安匡^{*} 田中信寿^{*} 松藤敏彦^{*} 松尾孝之^{*}

Yasumasa Tojo^{*}, Nobutoshi Tanaka^{*}, Toshihiko Matsuo^{*}, and Takayuki Matsuo^{*}

ABSTRACT ; To determine hydraulic property of solid waste materials, in situ intake rate measurements were conducted at surface of landfill. As object layers, incineration residue layers, refuse layers, and incombustible waste layers were selected to measure. Intake rate of incineration residue decrease suddenly after infiltration started, and then rapidly reach to constant rate, so called final intake rate, within 300 to 500 sec. Refuse layer also indicates similar intake rate transition. To confirm the relationship between final intake rate and saturated hydraulic conductivity, constant head hydraulic conductivity test was carried out for the same samples brought back to laboratory in undisturbed condition. Since good agreements are identified between them, hydraulic conductivity was estimated from the rate. Determined hydraulic conductivity is 10^{-4} to 10^{-1} cm/s for incineration residue layer, 10^{-2} cm/s for refuse layer, and 10^0 cm/s for incombustible waste layer. For trying to investigate the influence of matric suction to the rate curve, unsaturated water movement was simulated based on Green and Ampt theory. In respect with the curve obtained from incineration residue layer, water movement may be dominated by not suction but gravity, due to the analyses which exhibit calculated curve agree well when less suction was assumed.

Keywords ; Intake Rate, Landfill, Solid Waste, Hydraulic Conductivity

1.はじめに

降雨量の比較的多い我が国では、埋立地に降る雨水を適切にコントロールし、浸出水による外部環境へのインパクトを最小化することがリスク管理上重要である。適切な浸出水管理を実現するためには、廃棄物層内における水分の挙動を解明し、その移動現象を記述すること必要となるが、それには廃棄物層の水分流動に係わる特性値（飽和及び不飽和透水係数、水分特性曲線、含水率など）を把握することが必須となる。それらを測定するには、試料を実験室に持ち帰り、実験室内で測定する方法等に頼るのが一般的である。しかしながら、廃棄物の種類、大きさ、形状などが多様でサンプルの採取自体が難しいという問題が存在するため、現場の状況を実験室で再現し、測定値にその特性を反映させることが極めて困難である。すなわち、現場の特性を重視するならば、直接、上記の水分特性値を現位置で測定する方法が、より現実的であると思われる。しかしながら、これまで廃棄物層の透水性を現位置で測定した研究は極めて少ない。

現位置の土壌の浸透能を測定する古典的方法として、シリンダーインテークレート試験が農学、土壌物理学の分野で採用されている^{1),2),3)}。浸透能は、透水係数と、その場の含水率による吸引圧勾配から決定される特性値であり、飽和・不飽和透水係数、そして水分特性曲線と密接な関係を持っている。そこで、廃棄物層の浸透能測定から、これら一連の特性について検討することが可能になると考えられ、また、実験室で測定

^{*}北海道大学大学院工学研究科

(Div. of Environmental Resource Engineering, Hokkaido University)

される諸々の水分特性データと現場物性の関連も明らかになると思われる。さらに、埋立地における透水性は、媒体が不均一であることや、粗孔隙が多数存在することから、その内部における流れは、一般の土壌とは様相が異なるものと考えられ、土壌で採用される手法の廃棄物層への適用可能性を検討することもまた重要であると考えられる。そこで本研究では、埋立地現位置での廃棄物層の浸透能を、シリンダーインテークレート試験で測定することを試み、その浸透特性から主として現場の廃棄物層の飽和透水係数について検討した。

2. 既往の研究における廃棄物層の透水係数

既往の研究で報告される廃棄物層の飽和透水係数の多くは実験室で測定されたものである。また、その大半が廃棄物の種類として焼却灰を取り扱っている。花嶋ら⁴⁾は焼却灰の透水性について詳細な文献調査を行い、透水係数が 10^{-1}cm/s ～ 10^{-6}cm/s と非常に広範囲の値で報告されていることに着目し、その原因を実験カラムの大きさ及び試料の粒度調整にあると仮定して、粒度調整を行うケースと行わないケースとに分けて透水試験を行っている。その結果、試料の篩い分けを行った場合（30mm 通過試料）で 10^{-2} ～ 10^{-3}cm/s 、行わない場合（粒径 100mm 以上のみを除去）で 10^{-1}cm/s という値を得ている。また、廃棄物の種々の土質工学的特性を測定した研究⁵⁾では、焼却灰（4.76mm 通過分： 2.6×10^{-6} ～ $1.93 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、9.52mm or 19.1mm 通過分： 7.35×10^{-6} ～ $1.88 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ 、無篩い分け： 1.46×10^{-3} ～ $2.69 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ ）、破碎不燃物（ 4.91×10^{-4} ～ $1.47 \times 10^{-1}\text{cm/s}$ ）という飽和透水係数が報告されている。また、平田らによるプラスチック混入率を変化させた焼却灰の透水試験結果⁶⁾によれば、プラスチック混入率が5%になると透水性は極めて悪くなる傾向にあるが、それ以外では概ね 10^{-3} ～ 10^{-2}cm/s であるとされている。同様に、田中ら⁷⁾は、ポリエチレンフィルムと砂で廃棄物層を模擬し、フィルム物質の影響を検討しており、フィルム含有率が増加すると屈曲係数が急激に増加するため、流体の流動特性が低下することを明らかにしている。さらに、廃棄物層はその充填特性によっても透水性が大きく変化することが報告されており、焼却灰に対する充填密度を変化させた実験⁸⁾では、密詰め試料で 1.83×10^{-6} ～ $4.21 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 、緩詰めで 8.67×10^{-5} ～ $1.46 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ という結果が得られている。一方、焼却灰以外の透水性に関する報告は極めて少ない。これは、埋立地に搬入される可燃ごみ、不燃ごみ、及びそれらの混合ごみ等は、大きさ、形態等が極めて多様で、測定が困難であることや、測定値に試料の代表値としての特性を与え難いなどの問題によるものと思われる。直接埋立の多い海外においては、例えば、Korfiatis⁹⁾らがごみ層内水分移動のモデル化の研究において、埋立地から採取した都市ごみの飽和透水係数を定水位法で測定し、 1.3×10^{-2} ～ $8 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ という値を得ている。また、U.S.EPA の HELP モデル¹⁰⁾においては廃棄物特性のデフォルト値として一般廃棄物の飽和透水係数を $1.0 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ と設定している。

不飽和水分特性値に関しては、水分特性曲線と不飽和透水係数が国内の研究者により幾つか報告されている¹¹⁾。いずれの研究も共通している見解は、焼却灰等の廃棄物層は水分吸引力に乏しく、通常の土壌に比較して毛細管上昇高さが極めて低いが、水分保持量は土壌に比べ大きいというものである。

以上の通り、これまで報告される廃棄物層の透水性は、採取試料を実験室で測定したものが大半であり、また廃棄物の種類としても焼却灰が主体となっている。そこで本研究では、埋立地の現位置の特性に着目し、未攪乱の状態で透水性を測定することと、焼却灰以外の廃棄物層の透水性についても検討することを主眼に検討を行った。

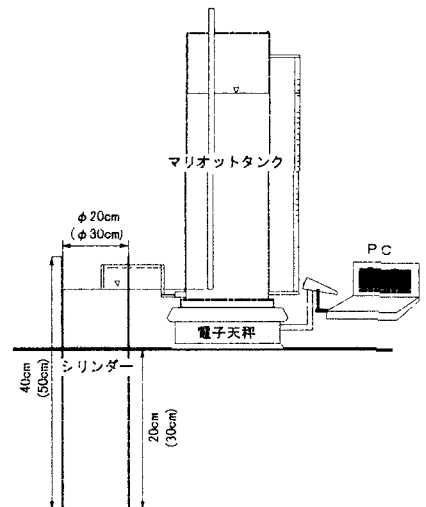


図1 浸透能測定装置

3.埋立廃棄物層の浸透特性の現位置測定

3.1 試験方法

本研究で用いた試験装置の概略を図1に示す。通常のシリンダーインテークレート試験は、鋼製の円管を土壌表面に打ち込み、その内部に水分を供給し、湛水させることで土壌中に水分流動を生じさせる。1次元浸透を対象としているため、一般的には打ち込んだ円筒外にさらに径の大きい円筒を打ち込み二重管とし、外部円筒と内部円筒の間にも緩衝池を設けて水分を供給し、水分流動が3次元的になることを防ぐようにしておこなう^{1),12)}。

しかしながら、本研究では、対象とする場が廃棄物層であるため、不意に大きなごみに突き当たるなどの問題があり、単一の円筒を打ち込むにもかなり困難が伴った。さらに二重円筒として埋設することは埋設作業に伴って場が乱される可能性が大きかったため、単一管として測定を行った。単一管のみで浅い深度に埋設した場合、浸透開始後すぐに3次元的な広がりを持った流れとなることが予測されたため、シリンダーは20cm～30cm程度埋設させることとした。

測定は、覆土を剥いで露出させた廃棄物表面を水平にならしてから、鉄板とハンマーを用いて廃棄物層にシリンダーを直接打ち込み、シリンダー近傍に電子天秤、マリOTTタンクを設置した後、シリンダー内にビニール袋を入れ、その中に、マリOTTタンクの水位と同一になるように水量を与え、測定開始と共にシリンダー内のビニールを引き抜き、浸潤を開始させて行った。浸潤は、シリンダー内水位とマリOTTタンク水位が一致した状態となるように水位変動には十分な注意を払ってマリOTTタンクからシリンダーへと水を流入させた。廃棄物層内への浸透水量はマリOTTタンクの重量変化として電子天秤で計測し、5～10秒間隔でパソコンに取り込んだ。使用したシリンダーはステンレス製で、内径が20cmで長さが40cmと50cmのもの、そして内径が30cmで長さが50cmの計3本を用意し、シリンダー径が測定結果に与える影響についても検討できるようにした。また、各測定地点では浸透試験前の初期含水率と密度の測定もあわせて行った。

3.2 測定理論

シリンダーインテークを用いた浸透能測定は、湛水浸潤に位置づけられる。土壌等の多孔質媒体は、その含水率に応じた水分吸引圧を有している。そこにある水頭を持った水面が急に形成されると、水分は土壌の吸引圧と表面にかかる正の水頭を駆動力とし、その時点の含水率に相当する不飽和透水係数を透水係数とした鉛直下降流となって下方へと移動してゆく。

一般に不飽和浸透現象はDarcy則を不飽和に拡張した次式で表現される。

$$q = -K(\theta) \cdot \text{grad}(\Phi) \quad (1)$$

ここで θ ：体積含水率、 q ：移動水分フラックス、 $K(\theta)$ ：不飽和透水係数、 Φ ：全ポテンシャル

シリンダーインテークレート試験ではシリンダー内部では鉛直一次元浸透と見なせるので、表面より下向きに座標軸 z をとると、全ポテンシャルは $\Phi = \phi + h$ (ϕ ：圧力水頭〔不飽和ではサクシオンポテンシャル〕、 h ：位置水頭〔 $h = -z$ 〕)であることから、 z 方向の水分移動フラックス q_z は、

$$q_z = -K_z(\theta) \frac{\partial(\psi + h)}{\partial z} = -K_z(\theta) \frac{\partial\psi}{\partial z} + K_z(\theta) \quad (2)$$

で表現される。浸透能は上(2)式におけるフラックス q_z の地表面での値である。試験開始と同時に湛水によって地表面には H_0 なる水圧が付加され、その水圧が維持されるのに対し、地表面直下の土壌はその含水率に相当するマイナスの圧力水頭を持っている。浸潤開始時点においてこのマイナスの圧力水頭は最も低く、その結果、圧力勾配は最大となり、浸透能は初期に最大値を示す。浸潤が進行するに伴い、含水率の上昇によって圧力勾配が減少し、浸透能も低下してゆく。そして浸潤前線が無尽遠に至る時点で(2)式右辺第1項の圧力勾配がゼロとなり、浸透能は一定値に達する。このとき地表面の含水率は飽和含水率になるので、最終浸透能は飽和透水係数とみなされる。ただし厳密には、この時点で媒体中が完全飽和しているとは見なすことは、

封入空気等の点から困難であり、一般的には飽和透水係数と完全に一致することはないとされている。

3.3 測定対象廃棄物層

測定は、札幌市及び近郊の自治体に存在する3処分場で行った。各埋立地の概要を表1に示す。測定対象と測定地点数は表2に示すとおりである。A処分場の焼却灰層では、覆土がなく焼却灰が表面に露出している面で24地点、及び重機を用いて70cm程掘削した地点で2地点とした。混合ごみを埋め立てているB処分場では、覆土を剥いで露出させたごみ

表1 測定埋立地の概要

	A処分場	B処分場	C処分場
埋立型式	平地埋立	山間埋立	平地埋立
埋立方法	セル式	セル式	セル式
埋立物	焼却灰、破砕不燃残渣	混合ごみ ^{b)}	不燃ごみ、粗大ごみ、焼却灰
埋立期間 ^{a)}	3年	5年	6年
埋立厚 ^{a)}	1.3m	6m	6m
覆土	無し	即日	即日

a) 測定地点の埋立年数、埋立層厚
b) 厨芥類 (26.9%)、紙類 (36.4%)、布類 (5.4%)、プラスチック類 (5.3%)、
ガラス・セラミックス類 (16.0%)、ゴム・皮革類 (0.4%)、木・竹・草・土類 (3.7%)、金属類 (5.7%)、その他 (0.2%)

層の表面を2地点、及び覆土そのものの測定を4地点で行った。そして不燃ごみを中心に埋め立てているC処分場では、覆土せずに不燃ごみを堆積していた場所で2地点、及び覆土がなされ十分な転圧もなされた場所を覆土を剥いで不燃ごみ層を露出させて2地点測定した。

表2 測定対象廃棄物層と地点数

埋立地	測定対象物	測定地点数	状況
A	焼却灰	24	覆土無く、焼却灰層が露出している表面
	焼却灰	2	表面より70cm掘削
B	覆土材	4	火山灰質の最終覆土
	混合ごみ	2	覆土を剥いだごみ層表面
C	覆土混じり不燃ごみ	2	覆土を剥いだ不燃ごみ層表面
	不燃ごみ	2	搬入後覆土されずに堆積している地点
海岸	砂	2	砂浜

4.測定結果

4.1 焼却灰層

焼却灰層の浸透能測定結果の例を図2に示す。いずれの測定点においても浸透能の変化曲線は浸潤開始直後に大きな浸透能を示し、その後急激に減少して概ね300秒以内に一定値に達する傾向を示した。現場の乾燥密度は約1g/cm³であり、別途測定した真密度から間隙率を算出してシリンダー内の全間隙が水分で満たされる時間を積算の浸入水量をもとに求めると約300~500sec程度であった。したがって、シリンダー内において浸透能が一定値に達し、焼却灰表層の間隙がほぼ満水になっている事が伺われる。

いずれの測定結果にもみられる浸透能の急激な低下は、焼却灰層内の流れの特異性によるものであると考えられる。広範な粒径分布を持ち、様々な大きさの間隙が不均一に分布する焼却灰では、粗孔隙が急速に水分で満たされるために、このような急激な浸透能の低下を示すものと思われる。このことは5節で検討するように、水分移動が主に上部に負荷する水頭によって生じていることによるものと考えられる。

最終浸透能は試験を行う場の締め固めの状況等により差異が見られるが、大半は0.01cm/s前後であった。一方、搬入路上などの非常によく転圧された場では10⁻⁴cm/s程度、また、投棄後十分な締め固めのなされていない地点では10⁻¹cm/s以上という結果も観測された。

一般に焼却灰層は埋立後の時間経過と上載荷重により固結し、透水性が低くなることが報告されている。そのため、埋め立てられた焼却灰を重機によって70cmほど掘削し、浸透能の測定を行ったが、

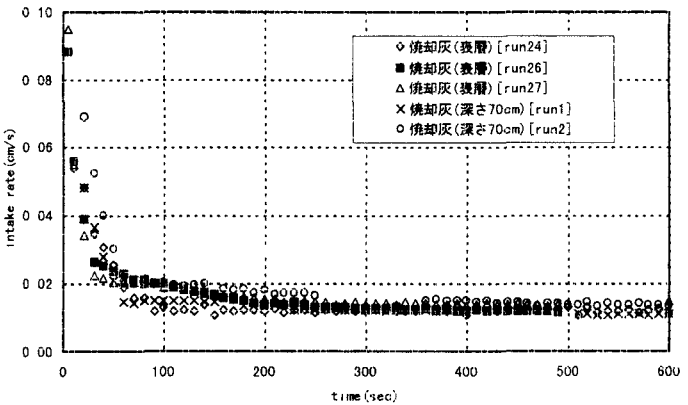


図2 焼却灰層における浸透能の経時変化

図2に示すとおり表層部とほぼ同等であり、深度方向への浸透能の変化を今回の測定では確認できなかった。これは深度が70cmと浅いこと、対象とした埋立地の総埋立厚さが未だ1.3mに満たず、上部からの载荷重を十分に受けていないことなどが理由と考えられた。また、原形のままの廃棄物層を対象に測定を行ったことから、シリンダー径の影響を確認するために直径20cmと30cmのものを用意したが、測定地点の締め固め等の影響に比べて差異は認められず、径の差による影響は確認されなかった。

4.2 混合ごみ層

混合ごみ埋立地では、埋立物が厨芥、紙、草木、プラスチック、衣類、皮革類、瓶、缶等と非常に雑多であり、それらの間隙に覆土が浸入しているという状況であった。特にプラスチックフィルムや衣類が水平方向に

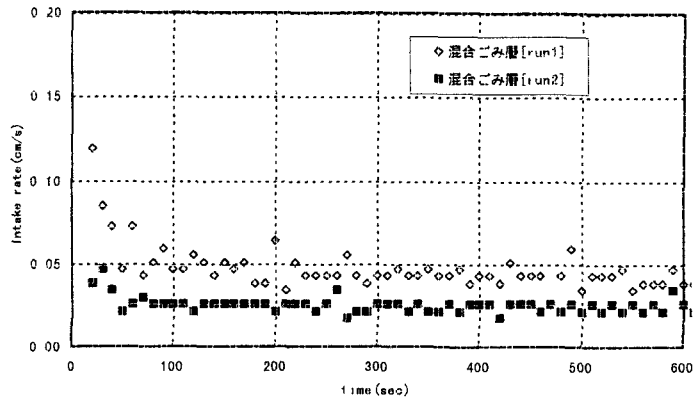


図3 混合ごみ層における浸透能の経時変化

層状に重なっており、水分の鉛直浸透を阻害していることが伺われた。ハンマーで叩いてシリンダーを埋設することは困難であったため、シリンダー側壁より埋設を妨害する廃棄物をカッターナイフ等で切断してシリンダーを押し込み、埋設した。測定結果を図3に示す。浸透能の変化曲線は、焼却灰層と同様測定開始時より急激に低下して一定値に達する傾向を示した。しかし、測定値の変動は焼却灰のそれに比べて大きく、測定時のマリOTT管内への空気の浸入状況からも水分の流入が不連続的に生じていることが確認された。これは、薄層状に堆積した構造の内部において、流路の伸長と間隙からの空気の排出が不規則に生じていたことによるものと思われる。2カ所の浸透能の最終値は約0.02と0.04cm/sであったが、本来ビニールフィルムの存在によって水平方向に迂回し、鉛直方向には浸透し難い水分を、シリンダーの埋設のために薄層を切断したことで、鉛直方向移動を生ずるようにさせたことが考えられ、測定方法に改善が必要であると思われる。

4.3 不燃ごみ層

不燃ごみ層では、搬入後覆土をせずにそのまま堆積した状態のごみ層露出面と、覆土がなされた地点で覆土を剥いで測定を試みた。堆積されただけのごみ層露出表面では廃棄物が不燃ごみとして回収された空き缶やペットボトル、プラスチック容器等の粗大物であり、間隙が多く、注入した水は一定水面に保持することが不可能なほどの透水性を示した。シリンダーを設置したが、マリOTTタンクによる給水では十分に水量を確保できなかったため、シリンダー内の水位低下速度を計測した。数回の測定の結果、正確性には乏しいがオーダーとして 10^1 cm/s という値を得た。覆土を剥いだごみ層表面でも同様に廃棄物が大きく硬いことから、用意した20cm径、30cm径のシリンダーでも埋設不能であり、直径20cm、深さ30cmの円柱形の穴を2カ所掘り、同一の穴で水位を数段階に設定して掘削孔からの浸透水量を測定した。本測定は掘削孔側面と底面からの三次元的な浸透となるため、透水係数の算出はゲルフパーミアメーター試験におけるRichardsの解析方法^{13),14),15),16)}に準じて決定した。ごみ層内に覆土がかなり混入しており、透水性は低く、覆土と同程度の 10^{-4} cm/s となった。すなわち、不燃ごみ層のような非常に大きな廃棄物からなる層も、覆土の混入によって間隙中を覆土材が塞ぐために透水性が覆土と同等になるといえる。

4.4 浸透能からの飽和透水係数の評価

本研究における試験方法は通常のシリンダーインタークレート試験の様な緩衝池を設けていないため、1 次元浸潤と見なすことのできるのはシリンダー埋設長の範囲内のみであると考えられる。そこで、本測定法によって得られる浸透能と飽和透水係数の関係を確認する目的で、それらの比較実験を行った。現場において浸透能試験終了後、試料をシリンダーごと乱さずに掘り返して実験室に持ち帰り、図4に示す装置にセットし、定水位の飽和透水係数試験を行った。本比較実験は、焼却灰層、混合ごみ層に加えて対照実験として海岸の砂浜でも浸透能試験を実施し、その試料に対しても行った。各測定結果より浸透能と定水位試験から得た飽和透水係数を両対数でプロットすると図5のようになる。データ数は少ないが、すべてのデータ点は I_c/K_s が2 倍の範囲内に入り、両者の対応は良好であると思われる。そこで、本測定における浸透能の最終値が概ね飽和透水係数を示すものと見なし、各廃棄物層の浸透能測定結果より飽和透水係数をまとめた。その概ねのオーダーを示すと図6のようになる。

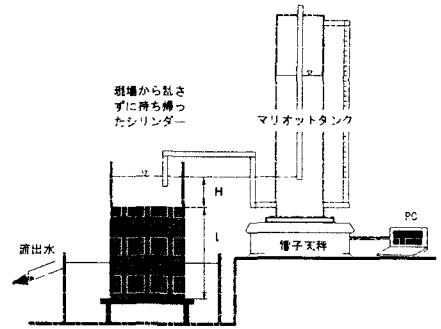


図4 室内定水位飽和透水試験

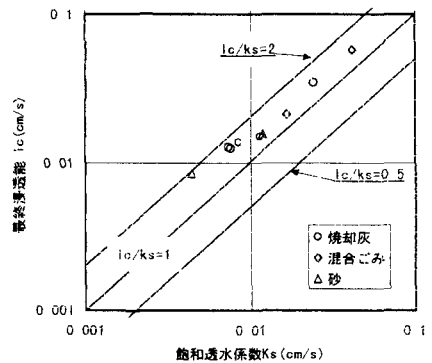


図5 比較試験による浸透能と飽和透水係数の関係

5 現場浸透能測定値の解析

土壌と異なり、不均一で粗孔隙の多い廃棄物層は湛水という特殊な条件下では吸引圧による影響は小さく、上部湛水深によって引き起こされる流れが支配的であることが浸透能の低下曲線から推察される。そこで、データ数の多い焼却灰の浸透能の変化曲線を対象に測定地点の含水率に対するサクシオンポテンシャルを仮定して解析を行い検討した。

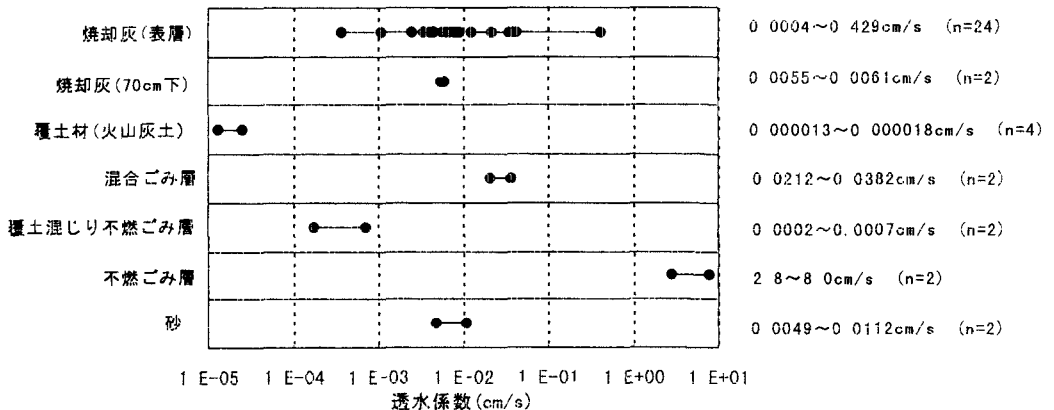


図6 本研究によって得られた浸透能から推定される各種廃棄物層の透水係数

5.1 解析方法

浸潤現象においては現象を単純化していくつかの解析解が与えられている。有名な古典的手法として、Philip、及び Green-Ampt の解析解があるが、本研究では後者の方法について検討した。

Green と Ampt の方法は、その単純なピストン流的表現のために、その適用性には議論が多いが、理論が明

快で現象を捉えやすいことや他の経験的な浸透能予測式と比較して予測性能が劣らないという利点も有し^{17),18)}、加えて、本方法は特に荒い土性の土壌への浸潤現象の場合には非常によい結果を与えるとも言われている¹⁹⁾。本試験で測定した試料はいずれも透水性のよい、大きな間隙を多数有するものであることから、本方法が適用可能であると考え、解析手法として採用することとした。Green-Ampt 式は、表面湛水深による水頭を H_0 、浸潤前線におけるサクションポテンシャルを H_f として、表面からの浸入水量 q_z を

$$q_z = -k_z \frac{(H_f - Z_f) - H_0}{Z_f} \quad (3)$$

とするもので、ここで、 k_z は浸潤領域の平均的な鉛直方向透水係数、 Z_f は浸潤前線までの距離である。微小時間内に微小体積内に貯まる水量は、 $\Delta\theta = \theta_s - \theta_f$ として、

$$q_z dt = \Delta\theta dZ_f \quad (4)$$

式(3)、(4)から初期条件 $t=0$ で $Z_f=0$ を用いて解くと、最終的に以下の式を得る。

$$\frac{k_z}{\Delta\theta} t = Z_f - (H_0 - H_f) \left\{ \ln \frac{H_0 - H_f + Z_f}{H_0 - H_f} \right\} \quad (5)$$

浸透能の経時変化を表現するには式(3)を用いることになるが、それには Z_f が必要である。そこで、式(5)において、 k_z 、 H_0 、 H_f 、 θ_s 、 θ_f を次のように設定する。Green-Ampt の方法では浸潤領域内は完全飽和と見なされることから、 k_z は飽和透水係数となる。同様に θ_s は飽和含水率、 H_0 は表面湛水深である。さらに、浸潤前線が完全な飽和帯の進行であると仮定するならば、 θ_f は媒体の初期含水率と見なすことができる。すなわち、初期含水率 θ_f におけるサクションポテンシャル H_f を仮定した上で、 Z_f を導き、 q_z を算出した。

5.2 測定結果に対する検討

砂、及び焼却灰に関する解析結果を図7、図8に示す。各媒体の初期含水率 θ_f に対するサクション H_f を、砂に対して $-50 \sim -0.5\text{cm}$ 、焼却灰に対して $-100 \sim -0.1\text{cm}$ の範囲で変化させ、実測の浸透能低下曲線に対する一致度を調べた。砂の浸透能曲線の実測値は、焼却灰に比べて浸透能が低下する速度が遅く、比較的長い間高い浸透能を維持する。これは、媒体内のサクションが水分移動の駆動力として作用しているためと考えられ、解析においては H_f

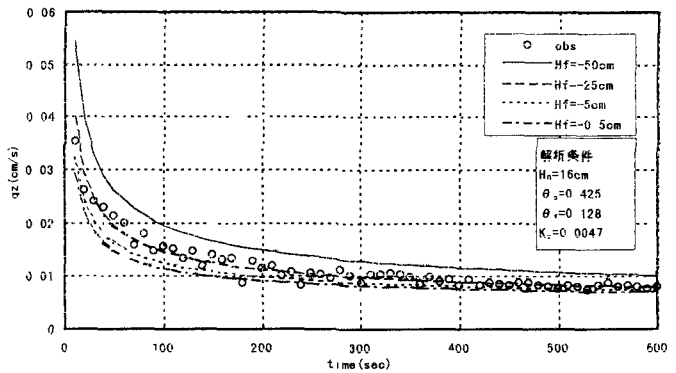


図7 砂の浸透能時間変化に対する Green-Ampt の解析結果

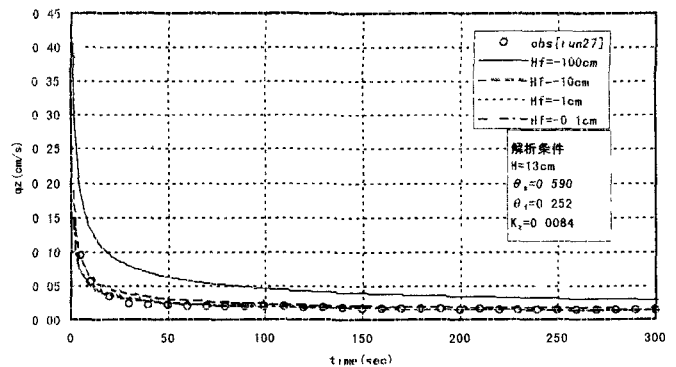


図8 焼却灰層の浸透能時間変化に対する Green-Ampt の解析結果

を-25cmとしたケースが最も実測値に近い結果となった。一方焼却灰は、浸潤開始より急激に浸透能が低下し、それを表現するには H_f を極めて小さくすることが必要で、-1cm~-0.1cm程度とすることでようやく実測値に近いものとなった。焼却灰については他の測定結果についても同様の計算を行ったが、結果は同様であり、浸透能の急激な低下を表現するには、本解析手法によれば媒体の初期含水率に対するサクシオンを極めて小さくしなければならないという結果となった。このことから、焼却灰層の水分吸引力が小さいことが伺われる。こうした焼却灰の特性は、以前より実験室スケールの研究²⁰⁾においても確認されている。

こうして砂及び焼却灰の現場初期含水率に対して探索されたサクシオンを、実験室で測定した水分特性曲線に対してプロットしたものが図9である。本水分特性曲線は内径5cmのカラムを利用した土柱法で測定したものである。砂においては探索されたサクシオンが水分特性曲線に近い値となっており、砂のような試料では浸透能低下曲線から、含水率に対応した初期サクシオンの概略値を推定することが可能であると思われる。

一方、焼却灰試料に関しては、水分特性曲線とは乖離した結果となったが、これは図8に示すようにサクシオンが-10cm程度以下となると水分特性曲線に対する感度が低く、最適値の特定が困難であること等が考えられる。従って焼却灰については、厳密にはサクシオンを推定できとは言えないが、極めて小さなサクシオンを仮定した解析結果が浸透能曲線に良好に一致したという事実は、湛水浸潤という特殊な条件下において、焼却灰層内の水分移動が毛管吸引力支配ではなく、重力支配によるものであるということを示すものであると考えられる。

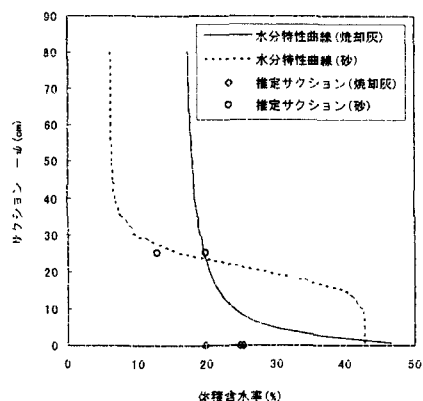


図9 浸透能低下曲線から推定されるサクシオンの水分特性曲線における位置

6. 結論

最終処分場の廃棄物層に対してシリンダーインタークレート試験を実施し、現場の廃棄物の透水係数、水分特性を浸透能曲線から検討した。得られた知見は以下の通りである。

- ・廃棄物層への現実の降雨浸透現象は不飽和浸透であるが、その不飽和浸透現象を表現する上でも飽和透水係数を把握することは必須であり、その意味から本研究ではその概略値を現場の廃棄物層に対する試験から直接求めることを試みたものである。採用したシリンダーインタークレート試験は、上部湛水という極めて特殊な条件下における透水現象であり、間隙空気の開塞等により、実際の飽和透水係数とは異なる事が報告されているが、現場で浸透能を測定した試料をそのまま実験室で定水位の飽和透水試験に供し、最終浸透能と飽和透水係数を比較した結果、両者が概ね一致する傾向を示したことから、最終浸透能を基に各廃棄物層の現位置における飽和透水係数を算出した。その結果、埋立地現位置における各種廃棄物層の透水係数のオーダーとして、焼却灰層： $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{cm/s}$ 、混合ごみ層： 10^{-2}cm/s 、不燃ごみ層： 10^0cm/s 、覆土混じり不燃ごみ層 10^{-4}cm/s という概略値を得た。
- ・焼却灰層、混合ごみ層の浸透能の低下曲線は、砂などの媒体に比較して浸透能が急激に低下して迅速に定常値に達する傾向を示した。Green-Amptの解析方法に基づいて媒体のサクシオンを仮定して検討した結果、焼却灰については極めて小さなサクシオンを仮定することにより測定された浸透能低下曲線を表現することが可能となり、本試験の条件下においてはサクシオンによる水分移動が支配的でないことが確認された。今回採用した Green-Ampt の解析法は、基本的に均質媒体を対象としているため、本研究では解析対象を焼却灰のみとしたが、不燃ごみ層や混合ごみ層のような極めて不均質な媒体での不飽和浸透特性を検討する場合には、マクロポア等を考慮した特殊な解析方法が必要となるものと思われる。

参考文献

- 1)農業土木学会編：土の理工学性実験ガイド，pp.114-115,農業土木学会
- 2)加納利博：畑地灌漑における Basic Intake Rate の土壌物理学的考察，石川農短研報，No.2, pp.21-32,1973
- 3)土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法，pp.168-177，養賢堂
- 4)花嶋正孝，松藤康司：「焼却灰」の埋立特性と今後の課題，都市清掃，Vol.39, No.150, pp.15-23, 1986
- 5)花嶋正孝 他：廃棄物の土質工学的特性への取り組みと課題，都市清掃，Vol.41, No.163, pp.148-167, 1988
- 6)平田登基男 他：プラスチック混入率が土質力学特性に及ぼす影響，第8回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.187-190, 1987
- 7)須賀研二，田中信寿他：廃棄物埋立層の間隙構造と透気係数に関する研究（第2報）—フィルム状物質を含む粒子充填層について—，土木学会第42回年次学術講演会第2部，pp.982-983, 1987
- 8)平田登基男 他：焼却灰の土質力学特性，第14回全国都市清掃研究発表会講演論文集，pp.290-292, 1993
- 9)Korfatis, G. P. Moisture Transport In A Solid Waste Column, ASCE, J. Env. Eng., 110(4), pp.780-796, 1984
- 10)Schorder, P. R., Dozier, T. M., Zappi, P. A. (1994).: The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, "Engineering Documentation for Version 3, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.
- 11)田中信寿，松藤敏彦：廃棄物埋立層における不飽和水分移動特性とその測定法に関する研究，廃棄物学会論文誌，Vol.4, No.3, pp.107-115, 1993
- 12)石川 清：シリンダーインテークレート試験における緩衝池について，第22回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1547-1550, 1987
- 13)中野政詩 他：土壌物理環境測定法，pp.105-110，東京大学出版会, 1995
- 14)塩沢 昌：定水位井透水計による現場透水係数の測定，農業土木学会誌，Vol.60, No.5, pp.391-396, 1992
- 15)Reynolds, W.D et al : A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table, Soil Science, Vol.136, No.4, pp.250-268, 1983
- 16)Reynolds, W.D et al : A Laboratory and numerical assessment of the Guelph Permeameter Method, Soil Science, Vol.144, No.4, pp.282-299, 1987
- 17)加納利博 他：浸入現象の転移について，農業土木学会論文集，No.63, pp.15-22, 1976
- 18)宮崎 毅：浸潤方程式，土壌の物理性，No.50, pp.56-62, 1984
- 19)Hillel, D : 土壌物理学概論，pp.138-141，養賢堂
- 20)東條安国 他：焼却灰層内における含水率と不飽和移動水分の関係，土木学会第51回年次学術講演会講演論文集，pp.570-571, 1996