

数種の廃棄物層内における不飽和水分移動に関する実験的研究

東條安匡¹・田中信寿²・松藤敏彦³・松尾孝之⁴

¹正会員 工修 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

²フェロー会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

³正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

⁴正会員 北海道大学技官 工学研究科環境資源工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13西8)

各種廃棄物の物理特性と不飽和水分移動特性を把握するために、都市ごみ溶融スラグと破碎残渣を対象に、比重、粒度分布、飽和透水係数、水分特性曲線を測定するとともに、一次元・二次元の不飽和水分移動実験を行った。いずれの廃棄物も大きな飽和透水係数を有するとともに、水分特性曲線も明瞭な毛管水縁を示さず垂直に立ち上がる性状を示した。対象とした廃棄物は粒度分布が広く、粗大間隙を流下する急流水による水分移動が支配的であると考えられたため、流束制御法により含水率と流束の関係を実測し、それを元に一次元水分移動式を決定した。また、二次元不飽和浸透に関しては、二次元実験の流出分布から横方向水分移動式を決定した。求めた関数系による計算結果は実測値を概ね再現した。

Key Words : unsaturated water movement, shredded residue, molten slag, multi-component flow

1. はじめに

今日、廃棄物埋立地に埋め立てられる廃棄物は焼却灰、粗大ごみを破碎処理した残渣、不燃ごみ、飛灰等の処理物、そして直接埋め立てられる混合ごみなど極めて多様である。したがって、埋立地内部の水分移動現象を扱う上でこうした廃棄物層内における水分移動特性を明らかにしておく必要がある。筆者らは、埋立地内の水分移動を層境界面に生ずる側方流を用いて積極的にコントロールすることを提案しているが¹⁾、そのためには、廃棄物のような不均質な媒体における鉛直及び水平方向の水分移動現象を把握することは不可欠である。そこで、本研究では、多様な廃棄物、特に今後主要な埋立物になるとされる中間処理残渣を対象に、水分移動に関わる基礎的な物理特性を把握するとともに一次元・二次元の水分移動現象の解明を試みた。対象とした廃棄物は、①スラグ、②粗大ごみの破碎残渣(本研究では、破碎処理された粗大ごみの内、埋立対象となる不燃性残渣を「破碎残渣」と称する)、③模擬人工ごみ(家庭系可燃ごみを模擬)である。本研究では、まず、(1)対象とした廃棄物の種類と概要について示し、(2)基礎的な物理特性(真比重、粒度分布、

飽和透水係数、水分特性曲線)の測定結果を示す。そして、(3)一次元と二次元の不飽和浸透実験を実施し、鉛直、水平方向水分移動を表現する方法について検討した結果を示す。

2. 試料

試料は、溶融形式の異なる5種類の溶融スラグ(SA～SE)、異なる5施設から採取した粗大ごみ破碎残渣(HA～HE)、そして家庭系の可燃ごみを想定して作成した模擬人工ごみ(MO)を使用した。それぞれの試料の概要を表-1、表-2、表-3に示す。溶融スラグの採取先はそれぞれ、SA: コークスベッド炉、SB: プラズマ溶融炉、SC: ガス化溶融炉、SD、SE: 表面溶融炉である。SB以外は全て水碎スラグで、黒色、ガラス質であり、徐冷スラグであるSBは、結晶質で、粒子が大きい。破碎残渣は、HAとHBが、家電製品等を多く含む粗大ごみの破碎残渣で、同一施設、異なる採取日に採取されたものである。また、HEは、粗大ごみ破碎施設であるが、試料採取日は冷蔵庫の集中的な破碎日であったため、試料の大半は冷蔵庫断熱材のポリウレ

表-1 溶融スラグの詳細

試料	溶融方式	溶融対象物	前処理		冷却方式
			選別	破碎	
SA	コークスベッド	可燃ごみ・不燃ごみ ・粗大ごみ	無し	有り	水冷
SB	プラズマ	流動床集塵灰	無し	有り	空冷
SC	ガス化溶融	シェレッダーダスト	無し	なし	水冷
SD	表面溶融	焼却灰・破碎残渣	鉄・7mm	なし	水冷
SE	表面溶融	焼却灰	鉄	有り	水冷

表-2 破碎残渣の詳細

試料	破碎対象ごみ	破碎方式	選別	残渣ふるい
HA	粗大ごみ	回転式	磁選機	振動ふるい (50mm)
HB	粗大ごみ (冷蔵庫除外)	回転式	磁選機・7mm 選別	振動ふるい (10mm)
HD	粗大ごみ	せん断+ 回転式	トロンメル 選別	トロンメル (50mm)
HE	冷蔵庫のみ	せん断+ 回転式	磁選機	なし

表-3 模擬人工ごみの詳細

構成試料	質量割合	比重
紙類	新聞紙	13% 1.43
	コンピュータ紙	18% 1.35
	ティッシュペーパー	4% 1.58
	段ボール紙	30% 1.35
織維類	白衣	12% 1.44
プラスチック類	プラスチックチューブ	23% 1.19

※紙類・織維類は、約2.5cm四方以下

プラスチックチューブは内径6mm、長さ約10mm

タンであった。破碎残渣は、回転ハンマーやせん断機により破碎された後、振動スクリーンやトロンメルにより可燃物が篩い上物として選別された後の篩い下に残る残渣である。したがって、試料の大きさは、施設の篩い目の大きさに依存する。今回用いた試料の施設での篩い径は HA, HB, HD で 50mm, HC で 10mm, HE は施設の運転上の問題からスクリーン通過後の試料を採取することが困難だったため、スクリーン通過前の試料を採取している。多くの施設は破碎機の後(スクリーンの前)に磁選機により鉄やアルミが回収されている。また、篩により可燃物が除去されるが、残渣中にも大量に木片等が存在している。破碎残渣の組成を図-1に示した。模擬ごみは、所定の割合で調合したものを水に十分なじませるために、洗濯機により攪拌混合後、いったん風乾し、その後各実験に使用した。調整の割合は、田中らの研究²⁾で用いられた模擬可燃ごみの組成を参考に決定した。

3. 試料の基礎物理特性と水分特性

(1) 真比重

JIS-A-1202で測定した。それぞれの試料について原姿のまま5サンプル(1サンプル: 約10~20g)採取し、測定に供した。試料の変動を見るためにSAについては40サンプルを、HAについては43サンプルを測定した。測定結果を図-2に示す。図には、各試料の真比

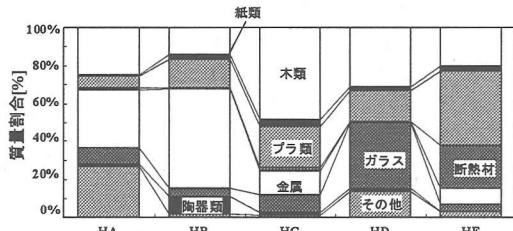


図-1 破碎残渣の組成

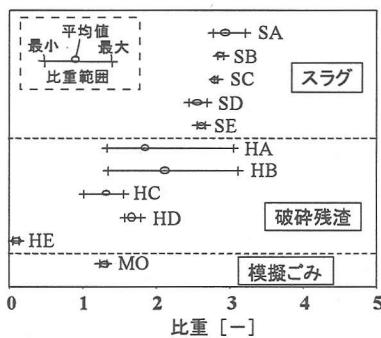


図-2 各種廃棄物の真比重測定結果

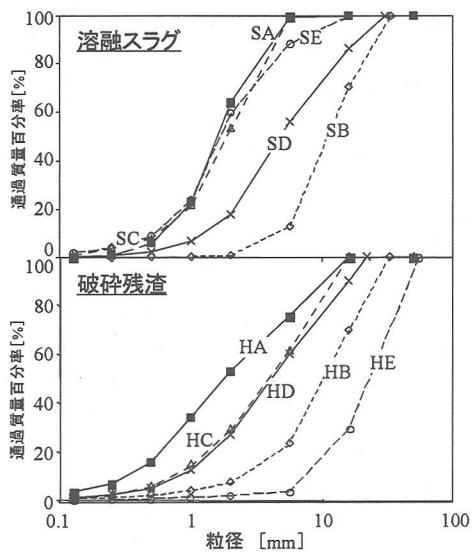
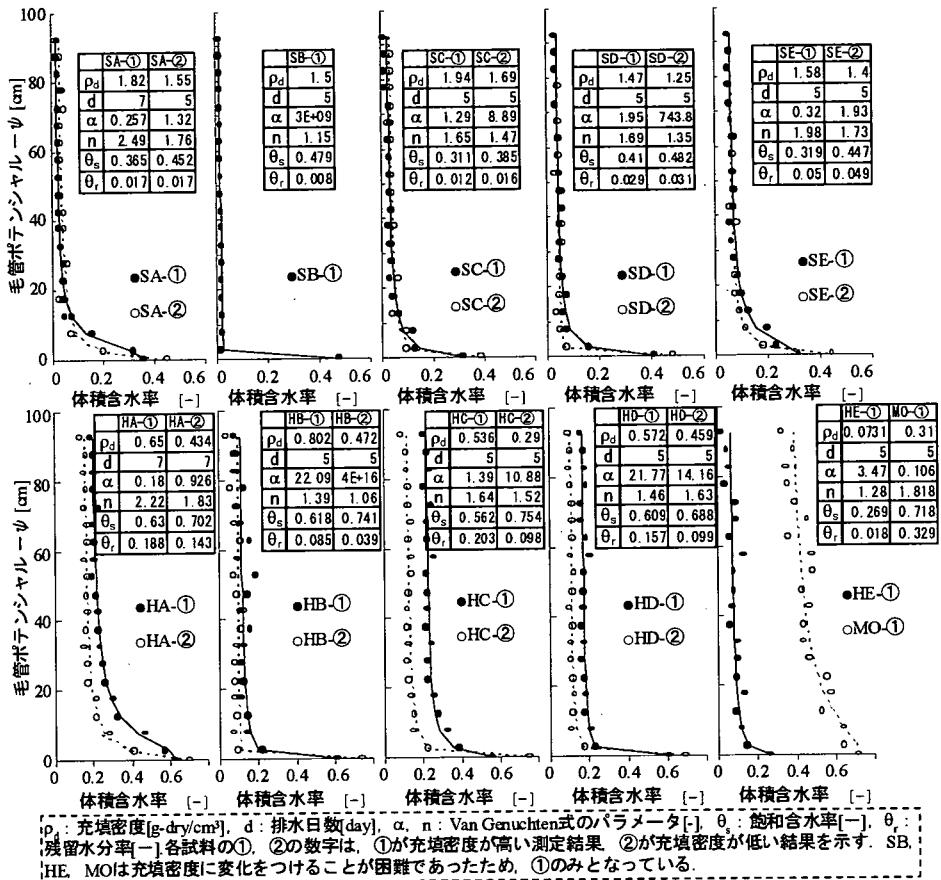


図-3 各種廃棄物の粒度分布

重測定値の最大、最小、平均を示した。

溶融スラグは異なる溶融形式であってもおおむね同様の真比重を示し、2.55~2.93となった。一方、破碎残渣は破碎対象物によってその性状が大きく異なるために、施設間の差異が大きく、全体としては0.10~2.12の範囲となった。HEが極端に小さな値を示した要因は、主成分がポリウレタン製断熱材であったためである。HEを除いた場合には、概ね1.33~2.12であった。また、模擬人工ごみの真比重は1.29となった。



p_d: 充填密度[g-dry/cm³], d: 排水日数[day], α: Van Genuchten式のパラメータ[-], n: Van Genuchten式のパラメータ[-], θ_s: 饱和含水率[-], θ_r: 残留水分率[-] 各試料の①、②の数字は、①が充填密度が高い測定結果、②が充填密度が低い結果を示す。SB, HE, MOは充填密度に変化をつけることが困難であったため、①のみとなっている。

図-5 各廃棄物の水分特性曲線

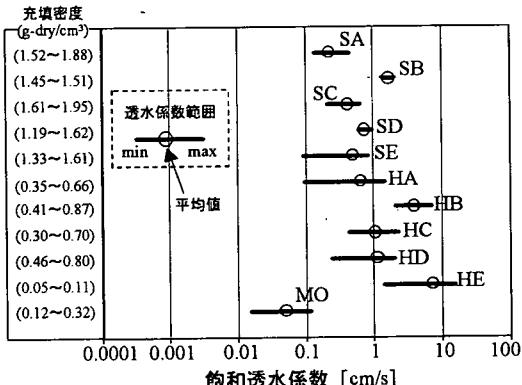


図-4 各廃棄物の飽和透水係数の範囲

(2) 粒度分布

測定は、1試料につき1000g(スラグ), 200~500g(破碎残渣)でふるい分析を行った(各試料につき1回測定)。各試料の粒度分布を図-3に示す。スラグはSA, SC, SEがほぼ同一の粒度分布を持ち、SBとSDが大きな粒子を多く含んでいる。特にSBは、徐冷したスラグを破碎したものため平均粒径(50%径)が11mmと大きい。一方、破碎残渣はいずれの試料も様々なな

粒径の粒子から構成されていることがわかる。HAが最も小さく、次いでHC, HD, HBの順である。HEは30~50mmの大きさのものが主体である。HAとHBは同施設の試料であるが、採取日を変えた結果、粒度分布に大きな違いがある。

(3) 飽和透水係数

各試料とも粒度が大きく透水性が高いと考えられたため、定水位の透水試験とした。各廃棄物の透水係数の幅を図-4に示す。同図中には測定時の充填密度も示した。スラグは $10^{-1} \sim 10^0$ cm/s、破碎残渣は $10^{-1} \sim 10^1$ cm/s、模擬人工ごみは $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sとなった。模擬ごみを除き、いずれの試料も透水性が高いといえる。

(4) 水分特性曲線

各試料について、充填密度を変化させ、密詰めと緩詰めの2通りの水分特性曲線を求めた。測定は土柱法を用いた。ヒステリシスを考慮するためには浸潤、排水の両過程で測定すべきであるが、すべて排水過程のみとした。各廃棄物の水分特性曲線を図-5に示す。ま

た、同図中には各試料に関してVan Genuchten³⁾のモデルに曲線近似して得たパラメーターも示した。

スラグは、いずれも、残留水分率が小さく(1~5%)、上部は表面吸着水のみであると考えられる。粒径の小さいSA, SC, SEは僅かに毛管上昇が認められるが、粒径の大きなSB, SDはほぼ垂直に立ち上がる水分特性曲線となっている。また、充填密度による水分特性曲線の差は小さい。破碎残渣は、粒径の細かいHAの密充填で毛管帶の上昇が認められるが、それ以外の試料では、概ね直線上に立ち上がる傾向にある。保持水分量は5試料それぞれに違いが見られ、約10%~20%である。毛管上昇が認められないのは、様々な粒径の粒子が存在するために粗大間隙によって、毛管上昇が遮断されているためと考えられる。こうした垂直に急激に立ち上がる水分特性曲線は焼却灰で確認されているもの⁴⁾と同様である。破碎残渣では、強く締め固めた状態の曲線が緩い状態よりも残留水分率が大きく、保持される水分量が多い傾向にあった。これは、破碎残渣の場合には強く締め固めることで間隙径が小さくなつたためと考えられる。模擬人工ごみ試料は他の試料と比較して残留水分率が大きく、保持される水分量が大きい。これは、作成した試料の大半が紙、布等の吸水性の成分であるからと考えられる。模擬人工ごみは、家庭系の可燃ごみを想定して作成したが、従来報告される可燃性ごみの水分特性²⁾も同様の結果が認められる。

4. 不飽和浸透特性

(1) 一次元パルス状降水実験

実験装置および実験方法は既報⁴⁾と同様である。実験条件を表-4に示した。スラグ(SA)と破碎残渣(HB)の実験結果を例として図-6に示す。図中には、Richardsの不飽和水分移動式⁵⁾とVan Genuchtenの水分特性曲線からの不飽和透水係数の推定式³⁾を用いて計算した結果もcal(V.G)として示した。スラグ、破碎残渣いずれの結果においても、水分特性曲線からの推定式を用いた計算値(cal(V.G))は、実測値に対して遅れた応答を示す結果となった。この傾向は、HAを除く全ての試料で確認された。そこで、既報⁴⁾と同様に直接、層内水分量と流束の関係を測定する実験を同一の一次元カラムを用いて行った。既報の焼却灰に関する検討では、流束が一定に達しても含水率が上昇したため、急流水に対応して増大する含水率(θ_{rapid})を分離して流束との関係を求めた。本研究で用いた試料では、破碎残渣に関しては焼却灰と同様の含水率上昇が認められたが、スラグでは含水率が増大する傾向は確認されなかつた。そこで、スラグは、増加含水率($\Delta\theta = \theta - \theta_{mi}$) [ここで、

表-4 一次元パルス状降水実験の実験条件

試料名	充填高さ H (cm)	充填密度 ρ_d (g-dry/cm ³)	降雨強度 I (mm/h)	降雨継続時間 TR (s)
SA	90	1.79	15.3	45180
SB	85	1.51	2.5	33600
SC	90	1.89	6.7	42000
SD	77.5	1.46	8.1	39600
SE	90	1.56	8.7	35400
HA	90	0.679	11.2	38400
HB	90	0.831	13.0	69240
HC	90	0.552	7.9	60000
HD	90	0.580	10.2	43200
HE	90	0.074	10.6	40200

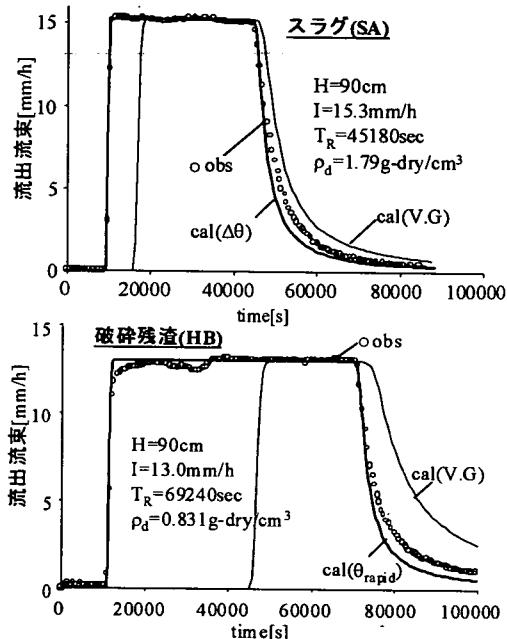


図-6 一次元パルス状降水実験の実験結果例

θ_{mi} : 初期含水率]で表現し、破碎残渣は、焼却灰と同様に急速に増加する含水率(θ_{rapid})で、流束との関係式を求めた。関数形は以下の通りである。

$$(スラグ) \quad v_z = K(\Delta\theta) = a\Delta\theta^b \quad (1)$$

$$(破碎残渣) \quad v_z = K(\theta_{rapid}) = a\theta_{rapid}^b \quad (2)$$

得られた流束(v_z)と増加含水率($\Delta\theta$ もしくは θ_{rapid})の関係を図-7に示し、式(1)(2)で表現したパラメータ a, b を表-5に示した。こうして得られた各関数を用いて再度パルス状降水実験の計算を行った結果が図-6中に実線(cal($\Delta\theta$)あるいはcal(θ_{rapid}))として示すものである。これらの関係式を用いることによって水分応答は概ね再現することが可能となった。

(2) 二次元水分移動実験

実験装置、実験方法は既報⁴⁾と同様である。実験条件を表-6に示した。実験結果の例として、スラグ(SA)と破碎残渣(HB)の定常時流出分布を図-8に示す。スラグは、粒径の小さいSA, SC, SEは図-8に示すSAと

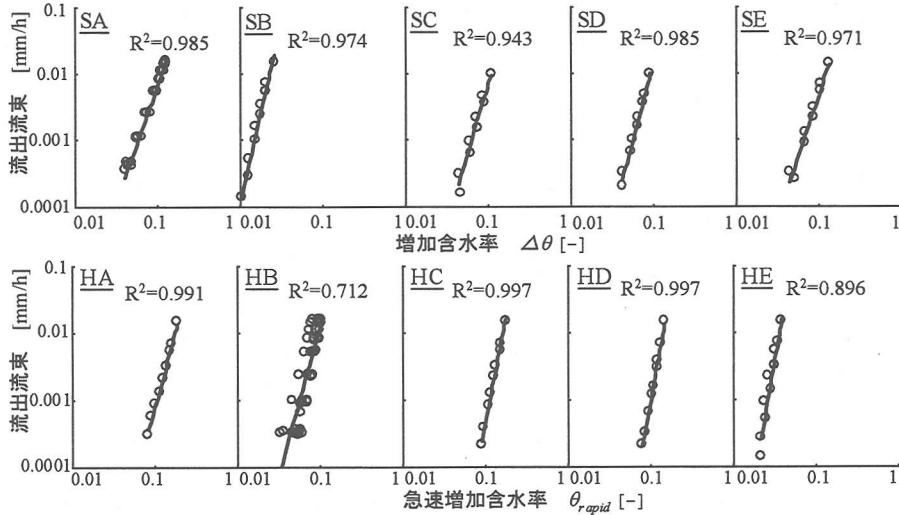


図-7 流束制御法によって得られたスラグと破碎残渣における流出流束と増加含水率の関係

表-5 スラグと破碎残渣の鉛直方向水分移動式のパラメータ a, b

	SA	SB	SC	SD	SE	HA	HB	HC	HD	HE
a	20.1	7.E+6	101	629	28.5	23.8	391	639	6967	9E+07
b	3.48	5.38	4.18	4.66	3.78	4.49	4.49	6.13	6.874	6.93

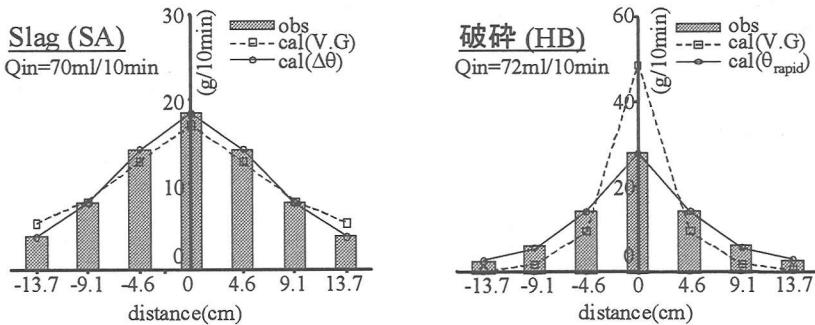


図-8 二次元水分移動実験結果（スラグ）

表-7 スラグと破碎残渣の水平方向水分移動式のパラメータ c, d

	SA	SB	SC	SD	SE	HA	HB	HC	HD	HE
c	942	1.47	303	5678	762	107	352	69.6	75002	9E+07
d	3.56	0.456	2.79	3.76	3.10	2.97	2.94	3.60	6.02	5.51

表-6 二次元浸透実験の実験条件

試料名	充填高さ ^(*)		充填密度 (g-dry/cm ³)	充填層の表面中央からの供給水量 (mL/10min)		
	Z _u (cm)	Z _l (cm)		1回目	2回目	3回目
SA	20	10	1.80	70	240	408
SB	20	15	1.53	79	219	412
SC	20	15	1.90	85	225	1461
SD	20	10	1.51	32	72	411
SE	20	10	1.54	30	74	420
HA	20	10	0.634	28	74	416
HB	20	10	0.769	32	72	406
HC	20	15	0.571	27	73	410
HD	20	15	0.568	76	222	1436
HE	20	15	0.071	31	73	420

(*Z_u, Z_lとは、文献4)に示した2次元実験装置における充填層の高さで、Z_uが仕切より上部、Z_lが仕切より下部の高さである。

ほぼ同様の流出分布であったが、粒径の大きいSB, SDは中央に集中する流出分布であった。破碎残渣は、HB, HC, HDが類似の流出分布となったが、HAは横方向

に広がる傾向を示し、HEは中央に集中する流出分布となった。図中に示す破線(cal(V.G))はRichards式とVan Genuchten式を用いた計算結果である。SAでは、概ね一致しているが、HBでは、中央に集中する傾向にあることが確認できる。計算値(cal(V.G))が実測の流出分布と概ね一致した試料はSA, SE, HAであったが、それ以外の試料では、HBと同様に計算値(cal(V.G))が中央側に集中する傾向にあった。

そこで既報の焼却灰⁴⁾と同様に、以下の式(3)(4)で横方向水分移動を表現し、横方向水分拡散係数(D_H)のパラメータ c, d を探索した。

$$(碎屑残渣) v_y = -D_H(\theta_{rapid}) d\theta_{rapid}/dy = c \theta_{rapid}^d d\theta_{rapid}/dy \quad (3)$$

$$(スラグ) v_y = -D_H(\Delta\theta) d\Delta\theta/dy = c \Delta\theta^d d\Delta\theta/dy \quad (4)$$

探索の結果得られたパラメータ c, d を表-7に示す。また、探索した結果を用いて計算した定常時の流出分布を図-8 中に実線 ($cal(\Delta\theta)$ あるいは $cal(\theta_{rapid})$) で示した。実測値に一致するように探索した係数のため、当然良好な一致を示すが、粒度が広範で、粗大間隙を含むと考えられる廃棄物層においても、こうした急流水に着目した不飽和水分移動の表現が有効であると考えられる。

5. まとめ

焼却灰以外の廃棄物種として溶融スラグ、破碎残渣、模擬人工ごみを対象に、水分移動に関する基礎物性値を測定し、一次元、二次元の不飽和浸透実験から、各廃棄物の鉛直、水平方向の不飽和水分移動について検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

(1) 対象とした試料の真比重は、スラグで 2.55 ~ 2.93、破碎残渣で 1.33 ~ 2.12、模擬人工ごみで 1.29 であった。

(2) 粒度分布は、スラグでは冷却形式、破碎残渣では施設内のスクリーンの大きさによって決定される。水碎スラグは平均粒径が 1 ~ 2mm 程度であるが、徐冷スラグでは 10mm 前後と礫相当である。破碎残渣は最大粒径がスクリーンの大きさとなるが、それ以下の粒径分布は広い。

(3) 飽和透水係数については、スラグは $10^{-1}\text{cm/s} \sim 10^0\text{cm/s}$ 、破碎残渣は $10^{-1}\text{cm/s} \sim 10^1\text{cm/s}$ 、模擬人工ごみは $10^{-2}\text{cm/s} \sim 10^{-1}\text{cm/s}$ であった。

(3) 水分特性曲線は、スラグ、破碎残渣共に明瞭な毛管水縁を示さず、残留水分率で垂直に立ち上がる傾向を示すもの多かった。スラグの残留水分率は 5% 以下、破碎残渣は 10 ~ 20%、模擬人工ごみは約 30% であった。

(4) 焼却灰と同様に、スラグ、破碎残渣の一次元不飽和浸透は、Richards 式では良好な適合は得られなかった。

既報⁴で報告した流束制御法から得た含水率と流束の関係から鉛直方向水分移動式を決定すると実測値を再現できることが確認され、各廃棄物のパラメータ値を示した。

(5) スラグのような粒子内部に水分を保持する特性がほとんどない廃棄物については、粒径が大きいことが膜状流⁶を適用しなければならない要因であると考えられる。一方、焼却灰⁴や破碎残渣では、大きな粒径の粒子を含むことに加えて、流度分布の幅が広い(すなわち間隙径分布の幅が広い)ことが、多成分流れを適用しなければならない要因であると考えられる(本研究で採用した方法は多成分流れのうちの急流水のみを対象としたものである)

(6) 横方向の水分移動に関しても、実測の流出分布から横方向水分拡散係数のパラメータを決定する方法によって実測値を再現できることを確認し、スラグ、破碎残渣に関する横方向水分拡散のパラメータを示した。

参考文献

- 1) Tojo, Y., Tanaka, N., Matsuto, T., and Matsuo, T.: Active control of leachate movement using landfill structure -numerical study-, *Proceedings of APLAS*, pp. 301-308, 2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 東條安匡、田中信寿、松藤敏彦、松尾孝之：焼却灰層内の不飽和浸透に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 720/VII-25, pp. 77-88, 2002.
- 5) 日野幹雄、太田猛彦、砂田憲悟、渡辺邦夫：洪水の数値予報＜その第一歩＞、森北出版、pp. 47-51, 1989.

(2002. 1. 16 受付)

UNSATURATED HYDRAULIC CHARACTERISTIC OF VARIOUS RESIDUES FROM INTERMEDIATE WASTE TREATMENT PROCESS

Yasumasa TOJO, Nobutoshi TANAKA, Toshihiko MATSUTO and Takayuki MATSUO

In order to understand unsaturated hydraulic characteristics of various residues from intermediate waste treatment process, measurement of specific weight, particle size distribution, saturated hydraulic conductivity, and water characteristic curve had been done. In addition one- and two-dimensional unsaturated water movement experiments had been conducted. Every residue has high hydraulic conductivity and peculiar water characteristic curve which doesn't have clear capillary fringe. One dimensional vertical water movement in those residues was dominated by rapid gravity flow because of macro pores which they contain. Vertical water movement formula was derived from the relation between water content and flux, which is obtained by flux control method.