

X線CT法による焼却残渣層中の孔隙空間分布に関する研究

九州大学大学院 学生会員 ○福井 晋平
 " 正会員 小宮 哲平
 " フェロー会員 島岡隆行
 熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文 大谷 順

1. はじめに

廃棄物埋立地では雨水浸透に偏りが生じ、雨水が浸透しにくい場所では、埋立廃棄物の安定化が良好に進行しないと考えられている。不均一な雨水浸透の要因の一つとして、可溶成分の溶出や炭酸塩等の析出による埋立廃棄物層中の孔隙構造の物理的構造変化が考えられるが、その現象解明は十分になされていない。

本研究では、焼却残渣層の水分移動現象を明らかにすることを目的に、焼却灰充填カラムを用いた水分飽和状態および水分不飽和状態での通水試験を行い、浸出水の水質分析ならびに、通水前後のカラム断面のX線CT画像を解析し、通水条件や孔隙の空間分布と孔隙変化の関連性について検討した。

2. 実験概要

2-1 通水試験方法 通水試験に用いたカラムを図1に示す。内径 $\phi 52$ mm、高さ200 mmのカラムに最大粒径5 mmに粒度調整を行った焼却灰試料を高さ95 mmまで充填した。充填密度は 0.87 g/cm^3 とした。過去の同様の研究において、通水後のカラム内の試料の乾燥が十分ではなく、X線CT法¹⁾によって通水前後の孔隙構造の変化を明確に評価できない²⁾という課題があったことから、本研究では絶乾状態（含水率0%）の試料を用いることにした。カラム上部から純水を供給し、水分不飽和状態または水分飽和状態の下降流で通水を行った。通水条件を表1に示す。水分不飽和状態では、微量定量ポンプを用いて一定の散水強度の人工散水により給水した。水分飽和状態のものは、流速を一定に制御して給水を行った。通水は、総通水量が固液比（L/S）30まで続いた。各カラムの浸出水は所定の時間間隔で採水し、蒸発残留物量（ER）を測定した。通水後は、焼却灰層を通水前と同様の絶乾状態とするため、カラム内の水分を自然排水させた後、105℃の恒温機の中に入れて焼却灰層を乾燥させた。

2-2 X線CT画像撮影の方法 X線CT画像の画素には物質のX線吸収係数から決まるCT値が与えられ、CT値は密度と比例関係にあることから、X線CT画像は被検体内部の密度分布を表す。X線CT画像はX線の照射厚に相当する厚みを有する画像であり、CT値は図2に示すボクセル内の見掛け密度を示す。

通水の前において、カラムの水平断面のX線CT画像を撮影した。各カラムにおいて、焼却灰層底面の5 mm上から焼却灰層表面の5 mm下の範囲を1 cm間隔で9断面撮影した。X線CT画像の撮影条件はX線発生起電圧を300 kV、X線照射厚を1 mmとし、撮影領域は直径150 mm（画素数2048×2048）の範囲とした。

3. 結果および考察

3-1 浸出水分析結果 図3に各カラムの浸出水のERの経時変化を示す。横軸はL/Sで通水量を無次元化している。水分不飽和状態で通水を行ったカラム No.1, No.2, No.3は通水開始直後に最大値を示し、その後は急激な減少を示している。水分飽和状態で通水を行ったカラム No.4, No.5, No.6は通水開始直後急激に上昇したが、その後、水分不飽和のカラムと同様に急激な減少が確認された。可溶成分の洗い出しは、通水方法によらず通水初期のL/S10までは顕著であると考えられた。ERの測定結果から通水に伴う全蒸発残留物量を算出した。カラム No.1, No.2, No.3, No.4, No.5, No.6の値は、それぞれ4.5g, 4.9g, 5.1g, 5.6g, 5.0g, 4.5gとなった。水分不飽和状態で通水を行ったカラムでは断面平均流速が大きいほど、また水分飽和状態のカラムでは断面平均流速が小さいほど全蒸発残留物量は大きな値を示し、水分の保持状態の違いにより、断面平均流速と可溶成分の溶出傾向は大きく異なることが確認された。つまり、水分不飽和状態では断面平均流速が大きくなるに連れて水分量が大きくなり焼却灰と水分

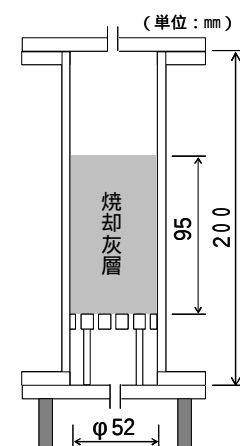


図1 通水試験用カラム

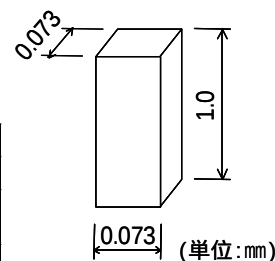


図2 ボクセル

表1 各カラム通水条件

カラム名	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
水分飽和度	水分不飽和状態			水分飽和状態		
断面平均流速 (cm/h)	1	2	4	14	110	540
総通水量 L/S(-)	30					

の接触が大きくなるので溶出が促されるのに対して、水分飽和状態では流入速度が小さいほど焼却灰と水分の接触時間が長くなり、溶出が促進されたと考えられる。

3-2 X線 CT 画像解析による孔隙の空間分布とその変化の把握

カラム No.1 とカラム No.4 の通水試験前後で得られたすべての X 線 CT 画像に対して画像処理を行い、一例を図 4 に示す。X 線 CT 画像はカラム内の試料断面を CT 値-1000 から 2000 の間を 256 色階調の白黒濃淡レベルで示したものであり、これを同心円状に 16 エリアに分割し、各エリアの平均 CT 値およびマクロ孔隙率の分布を求めた。マクロ孔隙率は二値画像内において黒色で示されており、1 mm の厚さを有するボクセル内が空気だけで占められているときの理論 CT 値-1000 よりも若干大きい-950 を閾値として処理した。

表 2 に通水前のカラム No.1 の平均 CT 値とマクロ孔隙率の平均値および標準偏差を示した。各断面の平均 CT 値とマクロ孔隙率分布の標準偏差の結果より各断面内ではばらつきがあることが確認された。また、断面間の平均値を比較してもばらつきがあり、カラム内では平均 CT 値およびマクロ孔隙率は空間的にばらつきがあることが確認された。カラム No.1, No.4 の全断面のすべてのエリアにおいて通水前 CT 値と通水前マクロ孔隙率の関係を図 5 に示す。CT 値が小さいほどマクロ孔隙率が大きくなる傾向を示し、CT 値とマクロ孔隙率の間には負の相関があることが示された。次に、カラム No.1, No.4 の全断面のすべてのエリアにおける通水前 CT 値と通水に伴う CT 値変化量の関係を図 6 に示す。カラム No.1, No.4 とともに CT 値変化量は 0 ~ -50 の値に集中していることが認められ、多くのエリアで通水に伴い CT 値は減少し、通水に伴い密度が低下したことが示された。一方で、カラム No.4 は CT 値変化量-50 以下を示すエリアが No.1 と比較して多いことが確認できる。カラム No.4 とカラム No.1 とでは、通水方法が水分飽和状態と水分不飽和状態と異なることから、水分飽和状態の方が CT 値を低下させる傾向があることと言える。なお、CT 値の低下は、上部からの 2 断面に集中しており CT 値の変化は上部ほど生じやすいという結果が得られた。

4. まとめ

浸出水の分析結果から水分不飽和状態では断面平均流速が大きいほど水分量が大きくなり、焼却灰と水の接触が大きくなるため溶出が促されたと考えられるのに対して、水分飽和状態では流入速度が小さいほど水分と焼却灰の接触時間が長くなることから溶出が促進されたと考えられた。また、X 線 CT 画像の解析から焼却灰層において平均 CT 値およびマクロ孔隙率の空間的な分布が確認された。平均 CT 値とマクロ孔隙率の間には負の相関が見られた。通水に伴い CT 値が 0 ~ -50 程度変化する場合が多く、水分飽和状態下での通水の方が CT 値の減少が顕著なエリアが多かったが、明確な傾向は確認されなかった。今後は、今回得られたカラム内の CT 値の空間分布と通水方法・条件を参考に、さらに画像解析を進め、得られた結果をもとに焼却灰層での水分移動現象のモデル化を行いたい。

[参考文献]1) 椋木俊文：地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究，熊本大学博士論文，2001. 2) 小宮哲平ら：X 線 CT 法による焼却残渣層の孔隙構造に関する基礎的研究，第 19 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.790-792，2008

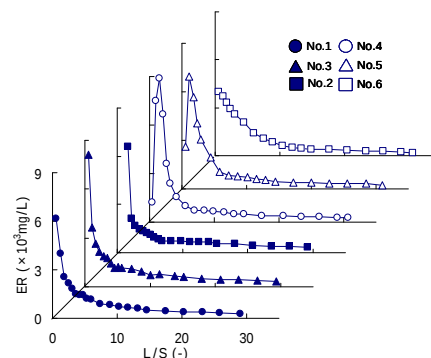


図 3 浸出水 ER の経時変化



図 4 X 線 CT 画像解析方法

表 2 カラム No. 1 の各断面の平均 CT 値およびマクロ孔隙率分布

深度 (m)	平均 CT 値		マクロ孔隙率 (%)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
0.5	-52	97	2.01	2.66
1.5	-60	78	0.82	0.95
2.5	23	108	1.17	1.03
3.5	-85	65	0.81	0.77
4.5	-7	90	1.75	1.84
5.5	-74	86	1.44	1.12
6.5	-30	114	1.00	1.30
7.5	-32	133	1.30	1.82
8.5	-31	117	2.79	2.02
全体	-39	103	1.45	1.68

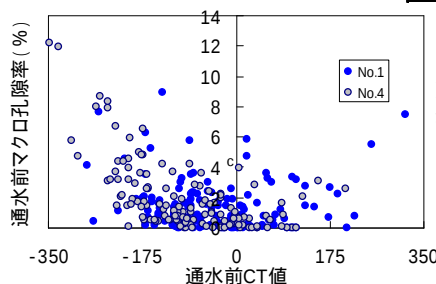


図 5 通水前 CT 値とマクロ孔隙率の関係

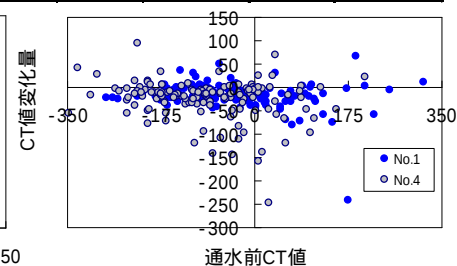


図 6 通水前 CT 値と CT 値変化量の関係