

廃棄物最終処分場の遮水シート破損部からの漏水に関する研究 (2)

Study on leakage from the defect of geomembrane liner of a sanitary landfill (2)

室蘭工業大学大学院 ○学生員 大野貴弘 (Takahiro Ohno)
室蘭工業大学 正 員 吉田英樹 (Hideki Yoshida)

1. はじめに

近年、廃棄物最終処分場からの漏水汚染問題が社会的な関心事となっており、より一層安全な最終処分場を建設することが必要となってきた。現在、我が国では、遮水工の基準¹⁾として、1)遮水シートの二重化、2)遮水シートと透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下で厚さ 50cm以上の地盤、3)遮水シートと透水係数 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ で厚さ 5cm以上の地盤、のいずれかになっており、遮水シートを中心とした遮水構造になっている。しかしながら、遮水シートは施工中の不備や施工後の劣化により破損を生じることがあるため、漏水汚染を引き起こす可能性がある。また、漏水汚染には廃棄物層内の分解反応によって、比較的温度の高い水が漏水する可能性もあり、これらのリスクを定量的に評価する必要がある。

本研究は、このような最終処分場で起こりうる遮水工からの漏水現象を明らかにすることを目的とする。ここでは、特に近年多く用いられている遮水シートとベントナイト混合土による遮水構造を例にとり、遮水工を模擬したカラムを用いて実験を行い、遮水工が破損した場合の漏水特性について調べるとともに、これまで提案されている理論推定法との比較を行った。また、高温水下でのベントナイト混合土の透水性についての実験を行った結果を述べる。

2. 実験概要

図-1 に実験装置を示す。装置は直径 10cm、高さ 13cmのカラム（以下、小カラムとする）と、直径 20cm、高さ 10cm（試料充填部）のカラム（以下、大カラムとする）の 2 種類がある。それぞれのカラム底部から漏出水の流量を測定できるようになっている。小カラムは試料充填カラムからなり、通水温度を変化させた透水実験に用いた。大カラムは水供給カラムと試料充填カラムからなり、破損を模擬した遮水シートを設置し、遮水シートが破損した場合の実験に用いた。さらに、試料充填カラムの上下部にそれぞれカラム底盤を設置し、透水実験も行った。試料は豊浦標準砂(透水係数 $6.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$: 水温 20℃)にベントナイトを混合率 10%とし、最適含水比(19.6%)で混合したもの(以下、ベントナイト混合豊浦砂とする)を用い、カラム内に 4 層に分けて締固め・充填した。図-2 に試料の締固め曲線を示す。また、比較として、遮水シートの下に透水性の高い地盤がある状況を再現するため、比較的水透係数の大きい豊浦標準砂を用いた実験も行った。

実験は試料充填後、温度を一定に保った状態で通水させ、カラム底部からの漏水流量を測定した。

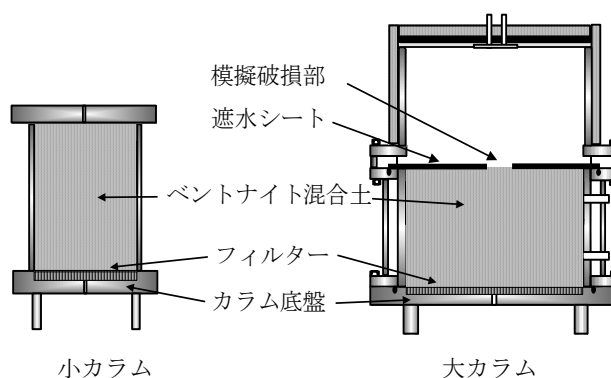


図-1 実験装置図

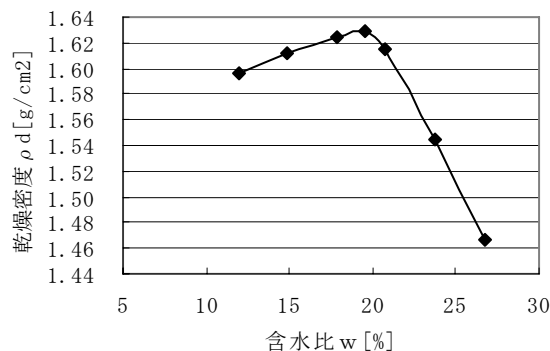


図-2 ベントナイト混合豊浦砂の締固め曲線

3. 実験条件

ベントナイト混合豊浦砂を用いた実験は、粘土を用いた実験であるため変水位実験とし、動水勾配は約 20.0 とした。豊浦標準砂のみで行った実験では、動水勾配を 9.0 とした。実験に用いた遮水シートは厚さ 1.5mm、ウレタン製でシート中心部に直径 10mm の円形の穴を開けることで破損を模擬した。また、小カラムでの透水実験は通水温度を 20℃、50℃、80℃と変化させて行った。

4. 実験結果

4.1 温度変化による透水実験の結果

表-1 に各々の実験条件及び結果を示す。豊浦標準砂

にベントナイトを混合すると、透水係数を $6.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ から $3.3 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ へと小さくできることがわかった。これは日本の遮水工基準で求められている $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ を十分に満たすものである。図-3 にベントナイト混合豊浦砂の温度と透水係数の関係を示す。それぞれの実験における透水係数の平均は 20℃では $3.3 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、50℃では $2.6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、80℃では $2.9 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ となった。20℃での透水係数と比較して、50℃での透水係数は約 0.79 倍、80℃での透水係数は約 0.88 倍となり、温度を変化させても透水係数はあまり変化しないことがわかった。また、遠藤²⁾も同様の結果を得ている。水の粘性係数の温度依存性を考慮して、50℃、80℃の温度条件の透水係数を、15℃換算の透水係数として計算する(温度補正)と、高温時での透水性が減少していることがわかった。80℃の温度条件を例にとると、15℃換算の透水係数は $2.9 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ から $1.4 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ へと減少する。温度変化による水の粘性係数の変化では説明できない結果となった。

そこで、ベントナイトの膨潤実験を行い、温度による膨潤特性の違いを検討した。写真-1 に温度と膨潤による体積の変化の関係を示す。写真左が 20℃、中央が 50℃、右が 80℃となっている。温度の増加に伴い、膨潤効果も大きくなることわかる。このことから、ベントナイトは、体積一定の条件下では高温水の方が膨潤圧が大きいと考えられる。そのため、高温条件での膨潤圧の変化が透水係数を小さくするメカニズムがあると考えられるが、本研究の実験のみではその詳細を明らかにすることはできなかった。ただし、遮水工の性能が高温条件でも維持されることになり、安全側に作用することになる。

表-1 実験結果一覧

水温 [℃]	充填試料	カラム径 [cm]	実験条件	動水勾配	漏水流量 [ml/h]	換算透水係数 [cm/s]
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.22	3.9E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.18	3.2E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.19	3.4E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.08	1.4E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.17	3.0E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.16	2.8E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート無	20.0	0.49	2.2E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート無	20.0	1.15	5.1E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート無	20.0	1.47	6.5E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート無	20.0	0.32	1.4E-08
50	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.25	4.4E-08
50	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.09	1.6E-08
50	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.1	1.8E-08
50	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.22	3.9E-08
50	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.08	1.4E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.14	2.5E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.24	4.2E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.13	2.3E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.1	1.8E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.19	3.4E-08
80	ベントナイト混合豊浦砂	10	遮水シート無	20.0	0.19	3.4E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.24	1.1E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.3	1.3E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.17	7.5E-09
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.32	1.4E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.19	8.4E-09
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.27	1.2E-08
20	ベントナイト混合豊浦砂	20	遮水シート有	20.0	0.23	1.0E-08
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	7.22	2.6E-03
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	5.10	1.8E-03
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	4.07	1.4E-03
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	4.02	1.4E-03
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	2.67	9.4E-04
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	2.53	9.0E-04
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	2.23	7.9E-04
20	豊浦標準砂	20	遮水シート有	9.0	1.63	5.8E-04

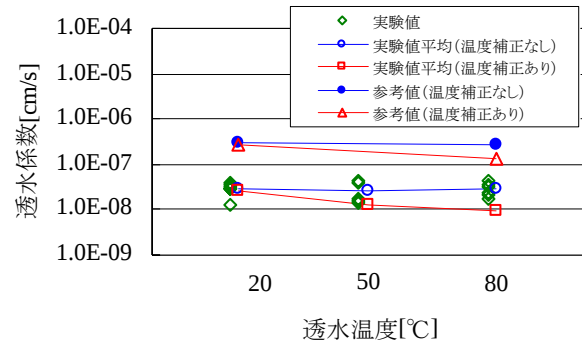


図-3 温度変化による透水係数への影響



写真-1 ベントナイトの膨潤実験
(左から 20℃、50℃、80℃)

4.2 遮水シート敷設による漏水流量への影響

図-4 に破損を模擬した遮水シート敷設による漏水流量への影響を示す。なお、グラフのy軸は実験に用いたカラムのサイズ及び動水勾配が異なるため、漏水流量を見かけ透水係数に換算している。破損を模擬した遮水シートを敷設した場合でのそれぞれの透水係数の平均はベントナイト混合豊浦砂では $1.1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、豊浦標準砂では $1.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ となった。遮水シートがない場合と比較すると、漏水流量はベントナイト混合豊浦砂で約 1/3、豊浦標準砂で約 1/5 に低減しており、破損があったとしても、遮水シートを敷設することで漏水流量を十分に低減できることがわかる。また、透水係数の高い豊浦標準砂に敷設した場合の方が漏水流量の低減効果は高くなっていることがわかる。

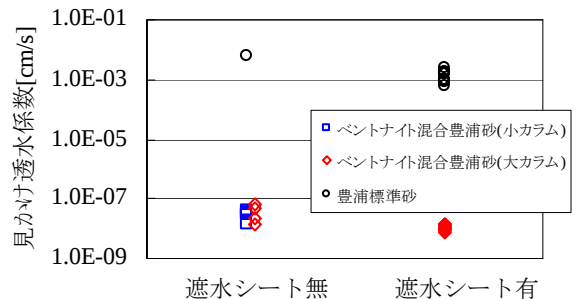


図-4 遮水シートの有無による漏水流量への影響

5. 漏水流量の推定モデルとの比較

5.1 Giroud らによる理論推定式について

遮水工の円形の破損からの漏水流量を推定する際に使われているGiroudらの提唱している方法から漏水推定値を求めた(以下、推定値とする)。透水係数 k_{UM} により以下に示す式³⁾を用いる。

$k_{UM} < k_{UM \max}$ の場合

$$Q = 0.976 C_{qo} d^{0.2} h^{0.9} k_{UM}^{0.74} \quad (1)$$

$k_{UM \max} < k_{UM} < k_{UM \min}$ の場合

$$\log Q = 0.3195 + 2 \log d + 0.5 \log h$$

$$- 0.74 \left(\frac{5 + 2 \log d - \log k_{UM}}{n} \right)^n \quad (2)$$

ここで、

$$n = 5.5540 - 0.4324 \log d + 0.5405 \log h + 1.3514 \log C_{qo} + 1.3514 \log \left[1 + 0.1 \left(\frac{h}{t_{UM}} \right)^{0.95} \right] \quad (3)$$

ただし、

$$k_{UM \max} = \left[0.3891 d^{1.8} / \left\{ C_{qo} \left[1 + 0.1 \left(\frac{h}{t_{UM}} \right)^{0.95} \right] h^{0.4} \right\} \right]^{1/0.74} \quad (4)$$

$$k_{UM \min} = 10^3 d^2 \quad (5)$$

Q : 漏水流量[m³/s]、 C_{qo} : シートと地盤の密着特性係数[-]、 d : 円孔の直径[m]、 h : シート上の水位[m]、 t_{UM} : 充填試料の厚さ[m]、 k_{UM} : 充填試料の飽和透水係数[m/s]

とする。各代入値を表-2に示す。

図-5 に実験値と推定値の関係を示す。グラフのy軸は実験に用いたカラムのサイズ及び動水勾配が異なるため、漏水流量を見かけ透水係数に換算している。推定値はそれぞれ、ベントナイト混合豊浦砂で 6.4×10^{-6} cm/s、豊浦標準砂で 3.0×10^{-2} cm/s となった。実験値の平均値と比べるとそれぞれ、ベントナイト混合豊浦砂で約 580 倍、豊浦標準砂で約 23 倍となった。Giroud らによる推定値は特にベントナイト混合豊浦砂での実験値に比べて、大きな推定値を与えていた。

表-2 Giroud 推定式代入値

パラメーター	名称	代入値
d [m]	破損部の直径	0.01
h [m]	遮水シート上の水位(豊浦標準砂)	0.8
	遮水シート上の水位(ベントナイト混合豊浦砂)	1.9
t_{UM} [m]	充填砂層の厚さ	0.1
k_{UM} [m/s]	充填砂層の飽和透水係数(豊浦標準砂)	6.6×10^{-5}
	充填砂層の飽和透水係数(ベントナイト混合豊浦砂)	3.3×10^{-10}
C_{qo}	シートと充填砂層の密着特性係数	0.21

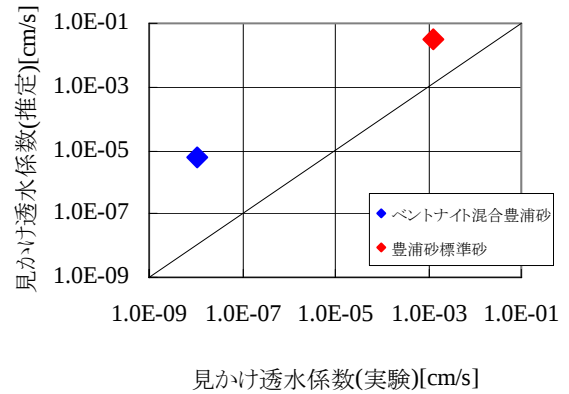


図-5 実験値と推定値との比較

5.2 他の理論推定式との比較

これまでに提案されている Giroud 以外の推定モデルを用い、実験値との比較を行った。それぞれ、以下に示す式を用いて推定漏水流量を求めた。

円筒流れ

放射状流れ

$$Q(1) = k_s a (h_w + h_s) / h_s \quad (6)$$

Brown による推定式

$$Q(2) = \pi k_s h_w d \quad (7)$$

$$Q(\text{Brown}) = 0.7 a^{0.1} k_s^{0.88} h_w \quad (8)$$

ただし、

Q : 漏水流量[m³/s] k_s : 充填砂層の飽和透水係数 [m/s]
 h_w : 遮水シート上の水位 [m] h_s : 充填試料の厚さ[m]
 d : 破損部の直径 [m] a : 破損部の面積 [m²]
 とする。各代入値を表-3に示す。

式(6)について、遮水シート破損部以下の水の流れが円筒状に流れるモデルより求めた漏水流量を円筒状流れ $Q(1)$ とする。式(7)について、遮水シート破損部以下の流れが放射状に流れるモデルから求めた漏水流量を放射状流れ $Q(2)$ とする。また、式(8)について、Brown らが提案している推定式より求めた漏水流量を $Q(\text{Brown})$ とする。

図-6 に実験値と推定モデル値との関係を示す。グラフのy軸は実験に用いたカラムのサイズ及び動水勾配が異なるため、漏水流量を見かけ透水係数に換算している。推定モデル値はそれぞれ、ベントナイト混合豊浦砂の $Q(1)$ で 8.3×10^{-11} cm/s、 $Q(2)$ で 3.1×10^{-9} cm/s、 $Q(\text{Brown})$ で 3.7×10^{-7} cm/s、豊浦標準砂の $Q(1)$ で 1.7×10^{-5} cm/s、 $Q(2)$ で 5.9×10^{-4} cm/s、 $Q(\text{Brown})$ で 1.6×10^{-2} cm/s となった。実験値の平均値と比べるとそれぞれ、ベントナイト混合豊浦砂の $Q(1)$ で約 0.0075 倍、 $Q(2)$ で約 0.29 倍、 $Q(\text{Brown})$ で約 34 倍、豊浦標準砂の $Q(1)$ で約 0.013 倍、 $Q(2)$ で約 0.45 倍、 $Q(\text{Brown})$ で 12 倍となった。ベントナイト混合豊浦砂、豊浦標準砂ともに放射状流れ $Q(2)$ の値が最も実験値に近いことがわかった。このことから、本実験に用いたカラムで行った条件では、遮水シート下の

水の流れが放射状に流れている状況に近いのではないかと考えられる。

表-3 推定モデル代入値

パラメーター	名称	代入値
d [m]	破損部の直径	0.01
a [m ²]	破損部の面積	3.1×10^{-4}
h_w [m]	遮水シート上の水位(豊浦標準砂)	0.8
	遮水シート上の水位(ベントナイト混合豊浦砂)	1.9
h_s [m]	充填砂層の厚さ	0.1
k_s [m/s]	充填砂層の飽和透水係数(豊浦標準砂)	6.6×10^{-5}
	充填砂層の飽和透水係数(ベントナイト混合豊浦砂)	3.3×10^{-10}

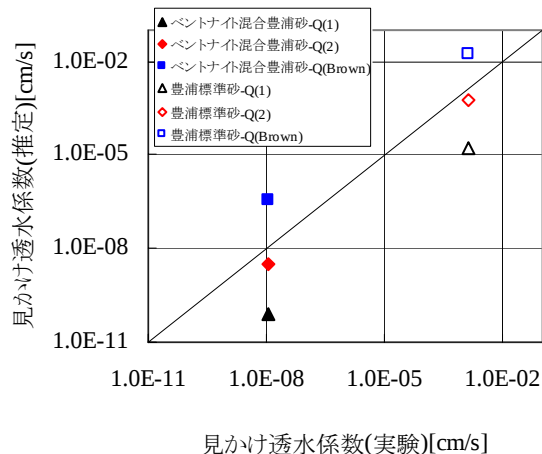


図-6 実験値と理論推定モデル値との比較

6. まとめ

本実験装置での漏水実験、漏水流量の理論推定式の適用を行った結果を以下にまとめる。

- 1) 豊浦標準砂にベントナイトを 10%混合し、最適含水比で締め固めを行うと、透水係数は 6.6×10^{-3} cm/s から 3.3×10^{-8} cm/s と約 10^5 オーダー小さくなり、遮水工基準である $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-7}$ cm/s を十分に満足した。
- 2) ベントナイト混合豊浦砂では、温度を 20℃ から 80℃ まで上昇させても透水係数はほぼ同じだった。温度の上昇とともに水の粘性が増大することを考慮すると、ベントナイト混合豊浦砂の透水性が減少していることになるが、これは高温条件下におけるベントナイトの膨潤圧の増大が影響しているのではないかと考えられる。
- 3) 直径 1cm の破損を持つ遮水シートを敷設した場合でも漏水流量は敷設しない場合に比べて 1/3～1/5 に低減できることが確認できた。特に、透水係数の大きい豊浦標準砂の方が低減効果が大きかった。
- 4) Giroud らにより提案されている理論推定式による漏水流量推定値は本実験値と比べて、ベントナイト混合豊浦砂で約 580 倍、豊浦標準砂で約 23 倍の値を与えた。また、他の理論推定モデルにより漏水流量推定値を求めた結果、遮水シート下の地盤での水の流れが放射状流れに近いと推定したモデルによる推定値が最も実験値に近くなった。

参考文献

- 1) 全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領, p.214～215, 2001
- 2) 遠藤和人他：廃棄物処分場の有害物質の安全・安心保障 最終成果報告書 第一章三節 遮水工破壊、2007
- 3) Giroud, J.P.・Bonaparte, R. :Leakage through a composite liner due to geomembrane defects, Geotextiles and Geomembranes, Vol.11, No.1, pp.1～29, 1992.