

廃棄物最終処分場遮水工模擬カラムによる漏水実験

Experimental study of the leakage from barrier systems in a sanitary landfill

室蘭工業大学大学院 学生員 河村彰一郎 (Shouchiroh Kawamura)
 室蘭工業大学 正員 吉田英樹 (Hideki Yoshida)
 室蘭工業大学 正員 穂積 準 (Hitoshi Hozumi)

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、より一層環境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2重化、2) 遮水シートと透水係数 10^{-6} cm/s以下で厚さ50cm以上の地盤、3) 遮水シートと透水係数 10^{-7} 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、これによる漏水汚染のリスクを定量的に評価する必要がある。本研究では、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して、遮水工を模擬したカラムを用いて実験を行い、漏水特性を明らかにするとともに、これまで提案されている理論的推定法および数値計算ソフトウェアを用いた解析で得られた結果との比較・検討を行った。

2. 実験概要

図-1に実験装置を示した。装置は水供給カラムと試料充填カラムからなる。水供給カラムは密閉させて、一定の水圧がかけられるようになっていて、試料充填カラムの底部には試料を支持するためのポラス盤が設置されている。試料上部表面には遮水シートを設置し、シート中心部には直径10mmの円形の穴を開けることによりシートの破損を模擬した。また、カラム底部からの流出水の水量を測定できるようになっている。充填試料としては、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、比較的透水係数の大きい豊浦標準砂(平均径0.17mm)を用いた。充填された試料は水分飽和状態で、カラム内の含水率分布が深さ方向にほぼ一定となるように、重量含水率約20%に調整して充填した。

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

3. 実験条件

予備実験として、充填試料の飽和透水係数を求めた結果、 6.6×10^{-3} [cm/s] (水温20℃)が得られた。実験はシート上の保護土を模擬した砂の厚さを0cm(以下シートのみ)、2cm、5cm、10cmと変えた場合について、実験を行なった。この実験における充填層に作用する水圧は90cmとした。

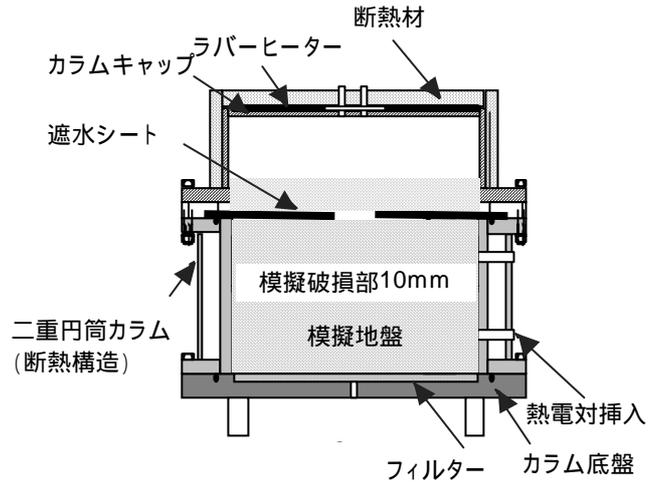


図-1 漏水実験装置

表 1 実験条件

実験NO.	水温【℃】	水位【cm】	シートの状態
1	20	90	シートのみ
2			シート上に砂層2cm設置
3			シート上に砂層5cm設置
4			シート上に砂層10cm設置

4. 実験結果

シート上の砂層厚さによる漏水流量への影響

図-2はシート上に設置した砂層の厚さの違いによる漏水流量変化を示している。条件ごとに3回の実験を行なった。図において、シートのみ条件(砂層厚さ0cm)は砂層厚0.1cmとして示している。推定値はシート上の砂層厚を考慮していないため一定値になっている。シートのみの実験 NO.1に比べ、シート上に設置した砂層の厚さを大きくすると漏水流量が減少した。たとえば、シートのみ条件(NO.1)に対して上砂10cm(NO.4)では流量が約1/10となった。このような流量の減少効果はシート上の砂層の厚さがゼロから2cmになったときに最も著しく、約1/6~1/7になる。それ以上砂層厚さが大きくなっても漏水量の減少率は小さくなっている。これは、シート上に砂層があることで、シートとシート直下の砂充填層上部の密着性が高くなり、漏水流量が減少すると考えられる。

また、シート上に設置した砂層で圧力損失が発生することによって、シート破損部近傍の圧力勾配が小さくなることで漏水流量の減少することが考えられるが、これらについては以下の解析を通して明らかにする。

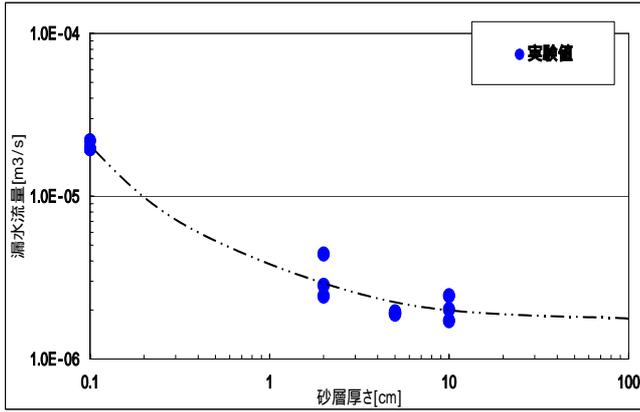


図 - 2 砂層厚さの変化による漏水流量の変化

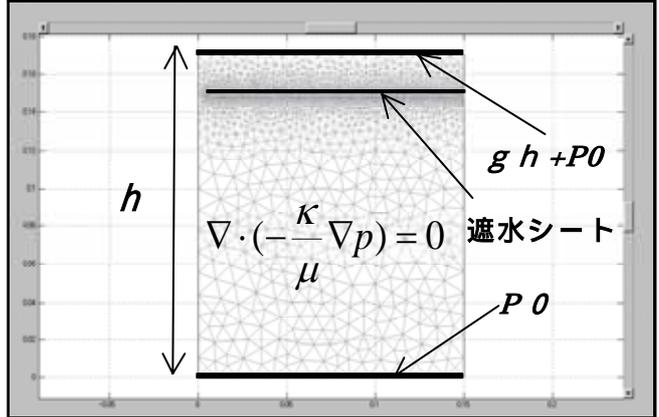


図 - 4 漏水シミュレーションの計算条件

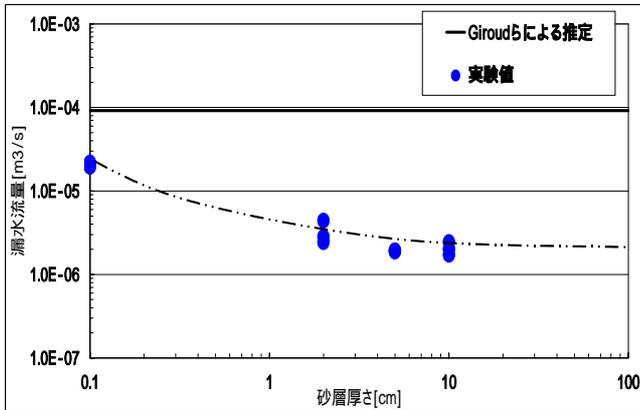


図 - 3 砂層厚さによる漏水流量変化による
実験値、推定値の比較

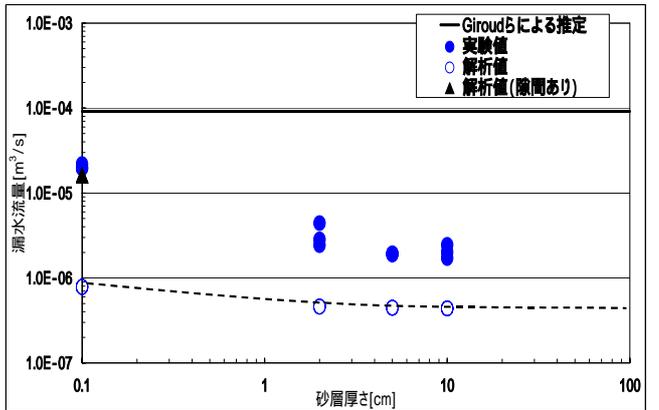


図 - 5 砂層厚さの変化による、実験値、
推定値、解析値の比較

5. Giroudらによる理論推定式

欧米の遮水工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。シート下の地盤の透水係数 k_{UM} の値により以下に示す式²⁾を用いる。

$$Q = 0.976 \cdot C_{qo} \left[1 + 0.1 \cdot \left(\frac{h}{t_{UM}} \right)^{0.95} \right] d^{0.2} \cdot h^{0.9} \cdot k_{UM}^{0.74} \quad (1)$$

$$\log Q = 0.3195 + 2 \log d + 0.5 \log h - 0.74 \left(\frac{5 + 2 \log d - \log k_{UM}}{n} \right) \quad (2)$$

$$n = 5.554 - 0.4324 \log d + 0.5405 \log h + 1.3514 \log C_{qo} + 1.3514 \log \left[1 + 0.1 \left(\frac{h}{t_{UM}} \right)^{0.95} \right] \quad (3)$$

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]、 a : 穴の面積 [m²]、 g : 重力加速度 [m/s²]、但し、 $C_{qo} = 0.21$ (密着性が高い場合) とする。

表 - 2 理論推定式でのパラメーター

パラメーター	名称	代入値
h	シート上の水位	0.8 [m]
d	円孔の直径	0.01 [m]
t_{UM}	充填試料の厚さ	0.1 [m]
k_{UM}	充填試料の飽和透水係数	0.0066 [m/s]
C_{qo}	シートと地盤の密着特性係数	0.21

実験値と推定値との比較を行なった結果を図 - 3 に示した。シートのみ条件 (NO. 1) で比較すると、推定値は実験値の約 5 倍の大きさを与えているが、漏水汚染リスク評価から考えると安全側にある。そして、シート上に設置した砂層厚さが増加した場合の実験値と比較すると、最大で推定値が実験値の約 4.5 倍になり、誤差が極めて大きくなる。

したがって、Giroud らの推定式では、漏水汚染リスク評価から考えると安全側の推定値を与え、また浸出水調整池のようにシート上に直接浸出水が貯留されているような場合での漏水問題ではほぼ精度良く漏水流量を推定できると考えられる。

6. 漏水解析方法と解析結果

次に、有限要素法 (FEM) を用いたモデリングにより、シート破損部を含めたマイクロな漏水シミュレーションを行った。解析の条件を図 - 4 のように設定した。

解析は円筒2次元座標系で行い、図はカラムの中心から右半分のみを示している。まず、砂層内部で定常状態を仮定し、次式のようにダルシー則と連続の式が成り立つとした。

$$\operatorname{div}\left(-\frac{\kappa}{\mu}\nabla p\right)=0$$

ここで、 κ は比透水係数[m²]、 μ は粘性係数[Pa·s]、 p はゲージ圧力[Pa]を示している。

境界条件として、シート上の砂層の上面に大気圧 p_0 と水圧 gh (ρ は密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 h はカラムに加わる水頭[m]) が加わり、砂層の下部が大気圧 p_0 になっていると仮定した。

図 - 4 は、実験値と FEM 解析値の漏水流量の比較を行ったものを示している。この比較では、シートのみ条件 (NO. 1) では解析値が実験値の約 1/2.5 と低い値となっている。そして、砂層厚さが増えると、その差は小さくなっているが、依然として、4 倍から 6.5 倍の差が生じている。これは、FEM 解析においては、遮水シート砂層上面が完全に密着している (完全に隙間がない状態) と仮定しているが、実際は実験ではシートと砂層上面には隙間が生じているため、漏水流量が増大し、このような差が生じていたと思われる。

そこで、シートのみ条件 (NO. 1) で砂層上面に 1 mm の隙間があり、シート直下の砂層上面に水圧が加わっていると仮定して計算した結果を図 - 5 に示している。実験値と FEM 解析値はほぼ一致し、シートと砂層の隙間の発生により、漏水流量が増大していることが説明できた。

さらに FEM 図解析結果について、シートの上に設置した砂及び遮水シートの密着性の変化により、充填カラム内、特に遮水シート破損部付近の圧力勾配と流速ベクトルがどのように変化しているかを図 - 6 に示した。

上の図は遮水シートのみを敷設した実験 NO. 1 の条件での計算結果、下の図は遮水シートの上に 2 cm の砂層を設置した上砂 2 cm (実験 NO. 2) の条件の計算結果をそれぞれ示したものである。等圧線は水頭で 5 cm ごとの間隔で示しあり、圧力勾配の大きいところが間隔狭く、小さいところが間隔広がっている。矢印は流速ベクトル分布及び流速ベクトルの方向を示したもので流速ベクトルが大きいところは矢印が大きく、流速ベクトルが小さいところは矢印も小さくなっている。また、右下に遮水シートの破損部周囲を拡大して示した。

左上の間隔が狭い部分に最大圧力 $p_0 + gh$ ($p_0 = 0$) が加わり、破損部の付近で大きな圧力勾配が生じていることがわかる。シートのみ (実験 NO. 1) と上砂 2 cm (実験 NO. 2) を比較すると、NO. 2 ではシート上に砂層が 2 cm あるためにそこで圧力損失が起こり、シート破損部付近での圧力勾配はシートのみ (実験 NO. 1) より小さくなっている (つまり、等高線の間隔が大きくなっている)。このように、シート破損部近傍の圧力勾配の大小が漏水流量を決める律速条件になっていることがわかる。このように、シート上に砂層を設置することによって、シート破損部近傍の圧力勾配が小さくなり、結

果として漏水流量を低減している。たとえば、処分場底部のシート上には廃棄物層の土圧が作用するが、シートとシート直下の地盤の密着性を向上するために砂層を敷設する、あるいは浸出水調整池の底部のシート上に砂層を敷設することにより、シート破損時の漏水流量を低減することが可能であると考えられる。本実験装置の条件でみると、例えば、90 cm の水圧が加わっている条件では、シートのみを敷設した場合よりシート上に砂層を設置した場合では最大で約 1/10 に漏水流量を低減できる可能性がある。

次に図 - 7 はシートと砂層上面に 1 mm の隙間が存在する場合のシミュレーションの図である。図からわかるように、充填層内で圧力勾配、流速ベクトルがほぼ一定となっていることがわかり、シート破損部近傍での圧力勾配が生じないため、漏水流量が大きくなることがわかる。

このように、遮水シートとシート直下の地盤との密着条件によって、破損部近傍の圧力勾配が大きく変化することで、シート破損部からの漏水流量は大きな影響を受けることが定性的・定量的に説明することができた。

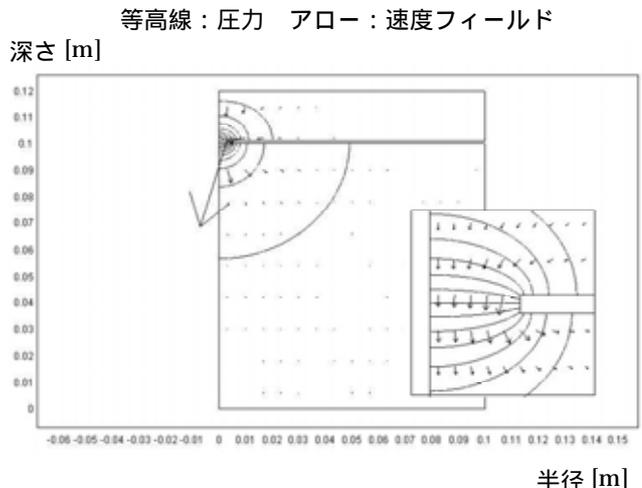
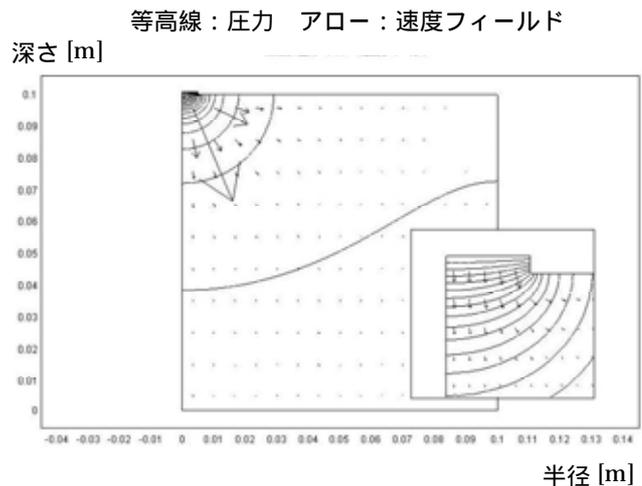


図 - 6 実験NO.1 (上図)、実験NO.2 (下図)での漏水シミュレーション (等高線：5 cm水頭間隔、流速ベクトル)

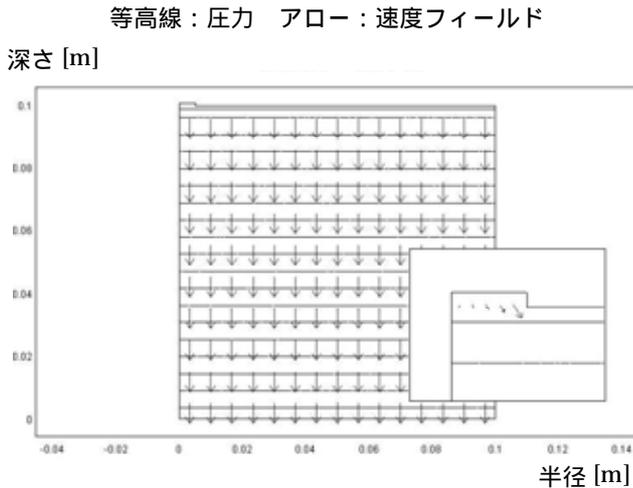


図 - 7 実験NO.1での漏水シミュレーション
(シート下部に1mmの隙間、等高線：5 cm水頭間隔、
速度ベクトル)

7. 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・有限要素法による数値シミュレーションを行った結果をまとめると以下のようになる。

1) 漏水実験を行った結果、シート上の砂層厚さを大きくすると、漏水流量が大きく低減した。シート上の砂層厚さ2 cm では、シートのみ条件 (NO. 1) より、漏水流量が約7分の1となった。ただし、それ以上砂層厚さが大きくなって低減効果は比較的小さい。したがって、浸出水調整池のようにシート上に直接浸出水が貯留されている場合には、シート上に砂層を設置することにより漏水流量を大きく低減できると考えられる。

2) Giroud らにより提案されている理論による漏水量推定値と実験値を比較した結果、シートのみ (NO. 1) の条件では実験値の約5倍の値を与えるが、シート上に砂層を設置した場合には約4.5倍と誤差が大きくなった。ただし、この推定値は推定値は漏水リスク評価では安全側にある。浸出水調整池からの漏水流量を推定する場合は精度の良い値を与えると思われる。

3) 有限要素法を用いた漏水シミュレーションによって得られた漏水流量の解析値と実験値を比較した結果、解析値はいずれの条件でも実験値より小さい値を示した。

しかし、シートと砂層上面に1 mm の隙間があると仮定して解析すると、シートのみ条件では解析値と実験値がほぼ一致した。さらに、漏水シミュレーションによる圧力分布及び流速ベクトル図から、シートと砂層の密着条件が変化することで、破損部近傍の圧力勾配が変化して、漏水流量が変化することが説明することができた。

謝辞

本研究は科学技術振興調整費「最終処分場の有害物質の安全・安心保障」(代表：小野芳朗)の補助を受けました。ここに謝意を表します。

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) 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.