

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

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

室蘭工業大学大学院 ○学生員 大西健夫 (Takeo Ohnishi)

室蘭工業大学大学院 学生員 佐々木睦 (Atsushi Sasaki)

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遮水工を建設することが必要となってきている。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、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破損状況を考慮して遮水工破損部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フィルターが設置されている。試料上部表面にはウレタン製遮水シートを設置し、シート中心部に直径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。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から水を通水させ、底部からの漏水流量を測定した。

3. 実験条件

表-1 に実験条件を示した。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層の厚さを0cm (以下シートのみ)、2cm、5cm、10cmと変えた場合と水温を20℃、50℃、80℃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砂層の上下端に作用する差圧は90cmとした。

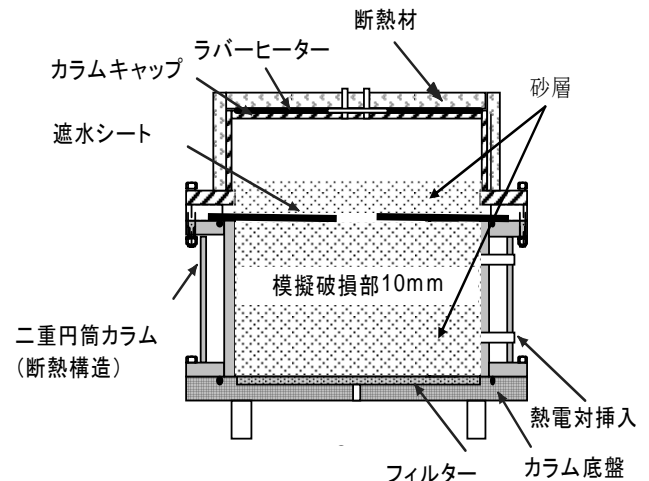


図-1 漏水実験装置

表-1 実験条件

実験No.	シート上部の条件	水温	最小	平均	最大
		[°C]	[ml/min]	[ml/min]	[ml/min]
RUN-20-0	シートのみ	20	98	147	433
RUN-50-0		50	258	287	508
RUN-80-0		80	353	392	624
RUN-20-2	砂層2cm	20	88	98	140
RUN-50-2		50	164	186	245
RUN-80-2		80	277	279	304
RUN-20-5	砂層5cm	20	63	71	73
RUN-50-5		50	134	138	173
RUN-80-5		80	173	194	276
RUN-20-10	砂層10cm	20	57	66	103
RUN-50-10		50	119	122	131
RUN-80-10		80	132	182	268

4. 実験結果

4.1 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。図のプロット点については最小、平均、最大を示している。

どの温度条件でも漏水流量はシートをみの条件からシート上の砂層を2cmの条件では約3分の2、シート上の砂層5、10cmの条件では約2分の1まで減少している。シートをみの条件で漏水流量変動幅が大きい理由としては、シートとシート下部の砂層との接触条件の違いによるものと思われる、シートとシート下部の砂層に隙間が出来たり、シート破損部直下の砂層が水流で掘れてくぼみが出来たりすることによって漏水流量に差が生じていると思われる。この減少のメカニズムは以下の解析を通して明らかにする。

4.2 温度変化による漏水流量への影響

まず、20℃の条件での漏水流量を1として、50、80℃の漏水流量を比で示した。50℃では1.9倍、80℃では2.7倍程度に増加している。透水係数が粘性の逆数に比例することから、漏水流量の増加は水の粘性の温度変化によるものと考え、20℃での粘性係数の逆数に対する50、80℃での粘性係数の逆数の比を計算して、図中にプロットしたのが図-3である。両者はほぼ一致していることから、温度変化に伴う漏水流量の変化は粘性によるものであることがわかった。ただし、図-2で示したように実験で求めた流量は大きく変動していることから、温度上昇による遮水シートの変形に伴うシートとシート下の砂層の接触条件の漏水流量への影響についても考慮すべきと思われるが、今回の実験のみでは明らかに出来なかった。

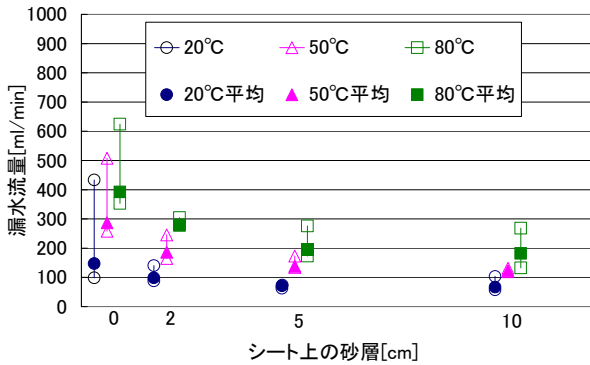


図-2 シート上の砂層の変化に対する漏水流量

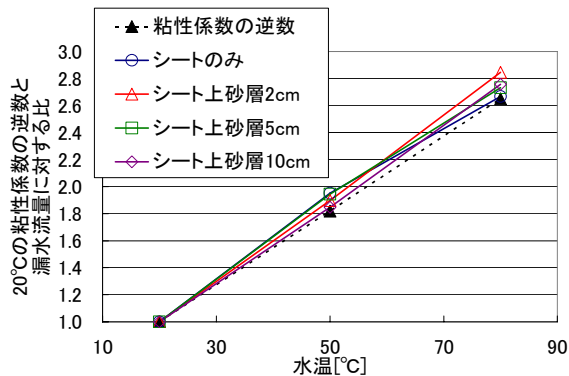


図-3 温度変化に対する漏水流量比

5. Giroudらによる理論と砂層シミュレーションでの推定

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を用いる。

$$\log Q = 0.3195 + 2 \log d + 0.5 \log h - 0.74 \left(\frac{5 + 2 \log d - \log k_{UM}}{n} \right)^n \quad (1)$$

$$n = 5.554 - 0.4324 \log d + 0.5405 \log h + 1.3514 \log C_{q0} + 1.3514 \log \left[1 + 0.1 \left(\frac{h}{t_{UM}} \right)^{0.95} \right] \quad (2)$$

ここで、 Q : 漏水流量 [m^3/s]、 C_{q0} : 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] を示している。

理論推定式の境界条件を表-2に示した。

表-2 Giroudらによる理論推定式の境界条件

パラメーター	名称	代入値
$d(m)$	破損部の直径	0.01
$h(m)$	シート上の水位	0.8
$T_{UM}(m)$	充填砂層の厚さ	0.1
$k_{UM}(m/s)$	充填砂層の飽和透水係数	6.6×10^{-5}
C_{q0}	シートと充填砂層の密着特性係数	0.21

5.2 有限要素法による解析について

有限要素法(FEM)を用いて、シート破損部を含めた漏水シミュレーションを行い、漏水流量を求めた(以下、解析値とする)。解析の条件を図-4のように設定した。

解析は軸対称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。

$$\text{div} \left(-\frac{\kappa}{\mu} \right) \nabla p = 0 \quad (3)$$

ここで、 κ は比透水係数 [m^2]、 μ は粘性係数 [$Pa \cdot s$]、 p はゲージ圧力 [Pa] を示している。

境界条件1として、シート上部の砂層の上面に大気圧 p_0 と水圧 ρgh (ρ は密度 [kg/m^3]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 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。

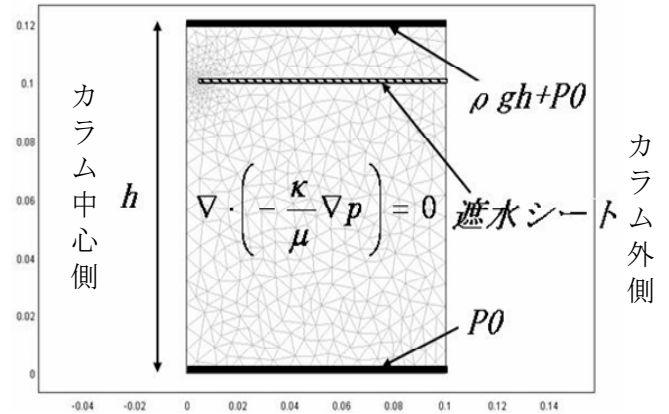


図-4 漏水シミュレーションの計算条件

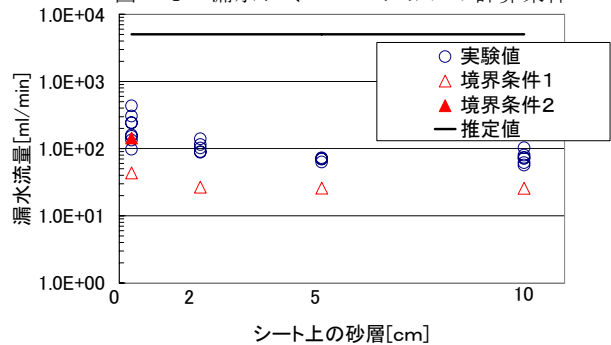


図-5 実験値と推定値と解析値との比較 (RUN-20-0, 2, 5, 10)

5.3 推定値と実験値との比較

推定結果を図-5に示した。シートのみで比較すると、推定値は実験値の約10倍の大きさを与え、この推定モデルではシート上部の砂層の影響を考慮出来ないで、シート上の砂層が厚くなると、実験値との誤差がさらに大きくなる。

Giroud らの推定式は、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に用いるのが適切であり、本実験のように透水性の高い土壤にシートが敷設され、シート上に保護土があるような処分場内部の条件では過大な漏水流量を与える可能性がある。最終処分場埋め立て地の場合でも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。

5.4 解析値と実験値との比較

解析結果を図-5に示した。解析値(境界条件1)と実験値を比較すると、シートのみとシート上の砂層2cmの条件では解析値が実験値の約3分の1となっている。シート上の砂層が5cm、10cmとなると、解析値が実験値の約2分の1になっている。この理由として、実験ではシートとシート下部の砂層との間に隙間が出来、漏水流量が大きくなったことが想定される。そこで境界条件2として、シートを破損部に深さ1mm半径1cmにわたって隙間があると仮定した。この場合、図-6に示したような境界条件となる。この条件で計算した結果を図-5に示している。実験値と解析値(境界条件2)がほぼ一致した。

このように、シートのみで条件について漏水流量が大きく変動したのは、このようなシートとシート下部の砂層との接触条件の違いによるものと考え、隙間の大きさを広げた場合の解析値を求めたものを図-7に示した。ここでは、境界条件1による解析値も示した。

隙間の半径が約3.5cmまで広がると、漏水流量の実験値の最大値にほぼ等しくなった。このように、実験ではシートとシート下部の砂層との接触条件が変化することによって、大きな流量変動が生じるメカニズムについてシミュレーションを通して類推することが出来た。

5.5 破損部近傍の水流れの様相

図-8はシートのみ及びシートとシート下部の砂層との間に隙間が存在する場合の計算結果である。等圧線は水頭で5cmごとの間隔で示した。矢印は流速である。まず、シートを破損部開口部上端に最大圧力 $p_0 + \rho gh$ が加わっているとしているが、破損部付近で大きな圧力勾配が生じていることがわかる(等圧線が密になっている)。それ以外の部分では等圧線の間隔が大きく、流れが破損部付近で生じている圧力勾配によって支配されていることが推察される。一方、シートとシート下部の砂層との間に隙間が存在する場合には、シート破損部の下に最大圧力 $p_0 + \rho gh$ が加わっているとしているが、圧力勾配が大きい(等圧線が密)範囲が半径方向にシートを破損部より広いために、漏水流量が大きくなっていると考えられる。

このように、シートとシート下部の砂層との接触条件によって破損部付近の圧力勾配が生じる条件が大きく変化し、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。

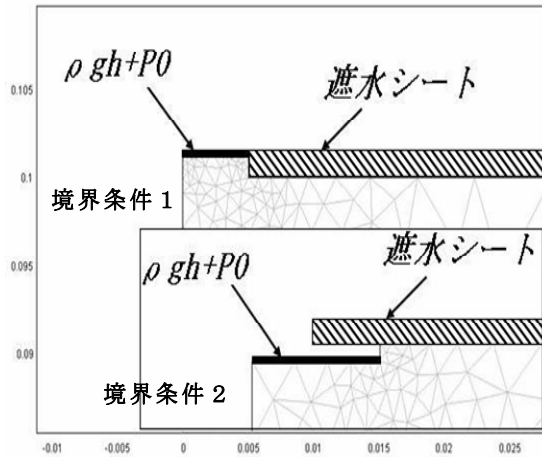


図-6 漏水シミュレーションの計算条件 (境界条件1、2)

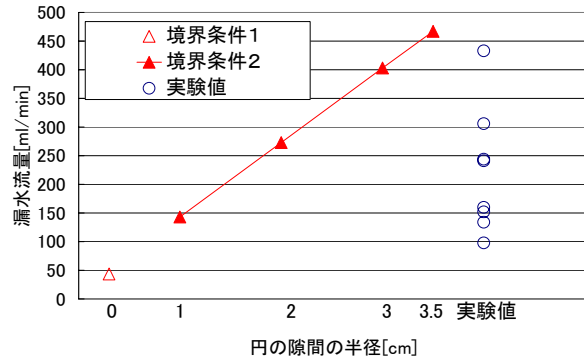


図-7 隙間を広げた場合の漏水流量の関係 (RUN-20-0)

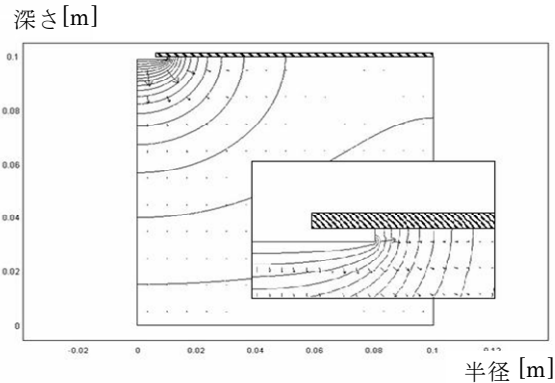
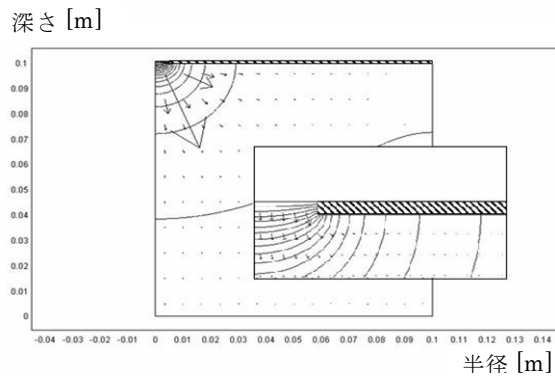


図-8 シートのみ(上図)、シート下部に隙間がある条件(下図)での漏水シミュレーション (等圧線: 5cm水頭間隔、流速ベクトル)

図-9はシート上の砂層2cmの条件の計算結果を示したものである。図-8のシートのみ条件と比べるとシート上の領域で圧力損失が起こり(圧力勾配が生じている)、シート破損部付近での圧力勾配はシートのみ条件より小さくなっている(等圧線が粗)。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の支配条件になっていることがわかる。

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。シートの保護土としては、シートとの密着性が良好になるように例えば豊浦砂のような粒度の細かいもの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、90cm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は最大で約1/2に漏水流量を低減できる可能性がある。

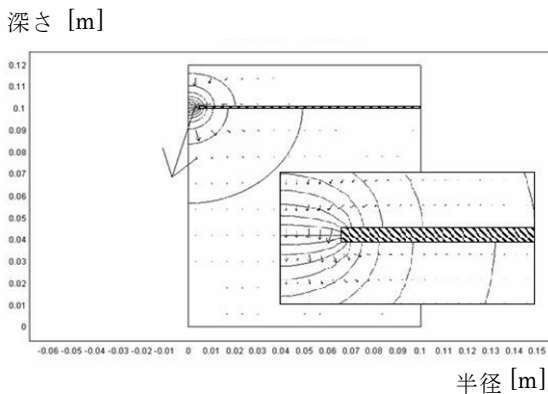


図-9 シート上に砂層2cmでの
漏水シミュレーション
(等圧線：5cm水頭間隔、流速ベクトル)

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・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ようになる。

1) 漏水実験を行った結果、温度上昇に伴って漏水流量が増加する傾向は水の粘性の影響が減少し、透水係数が増加する傾向と一致した。温度上昇に伴うシートの変形の影響は顕著には見られなかった。

2) シートのみ条件に対してシート上の砂層を敷設すると、漏水流量が減少した。シートのみ条件と比較してシート上の砂層2cmでは漏水流量が約3分の2となり、シート上の砂層5、10cmでは漏水流量が約2分の1となった。シート上に粒度の細かい砂層を設置することにより漏水流量を低減できると考えられる。

3) Giroudらにより提案されている推定式による漏水流量推定値と実験値を比較した結果、シートのみ条件では実験値の約10倍の値を与えるが、シート上に砂層を設置した場合、最大で約100倍と誤差が大きくなった。

4) 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、シートとシート下部の砂層が隙間なく密着しているという条件での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、シート破損部に深さ1mm半径1cm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。シートとシート下部の砂層にわずかな隙間が出来ても、漏水流量が著しく増加することがシミュレーションからわかった。これはシートのみ条件で漏水流量の実験値が大きく変化した理由であったと思われる。

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.