

電場制御と電流測定による 電気的漏水位置検知方法

荒井 健¹・山崎 宣悦²・大即 信明³

¹正会員 前田建設工業株式会社 土木設計部 (〒179-8903 東京都練馬区高松5丁目8番 J.CITY)

²株式会社レイディック (〒202-0022 東京都保谷市柳沢2-17-20)

³正会員 工学博士 東京工業大学 開発システム工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

管理型廃棄物処分場の斜面部遮水シートに、コンクリートや土質材料の保護層を設けると、保護層が遮水シート上下を結ぶ電気経路となる。こうした条件では、漏水周辺に生ずる電位異常や電流の増大が生じにくく、漏水を検知することが非常に困難となる。

筆者らは、こうした斜面部のシートに保護層が設けられた管理型処分場のために、遮水シート上下の電場を制御しつつ電流を測定する漏水位置検知システムを開発した。本論文は、電場制御を併用した電流測定による漏水位置検知の原理を説明するとともに、その実験結果によりその効果を示すものである。

Key Words: landfill site, geomembrane, leak detection, resistivity, electric potential

1. はじめに

近年の合成樹脂の土木分野への応用は大きな広がりをみせている。その一例として、遮水シートの管理型廃棄物処分場や農業用溜池および水路への適用があげられる。遮水シートを利用することにより、地盤が透水性であっても高水密性の溜池や水路を建設することができるばかりでなく、廃棄物からの有害物質を含む浸出水が周辺地盤へ漏出しない管理型廃棄物処分場を建設することができる。しかし、遮水シートに何らかの要因によって損傷が生ずると、遮水シートの損傷部分から漏水して貴重な水が失われたり、廃棄物処分場から有害物質が周辺へ漏洩する。

こうした遮水シートからの漏水に対して、管理型廃棄物処分場では、従来からモニタリング施設として観測井戸が設けられているが、異常が確認された段階では、遮水シートの地盤側に有害物質が広範に広がった状態となっており、環境修復のために多くのコストや時間が必要となる。こうした事態を未然に防止するために、遮水シートの漏水について常時監視し、漏水が小規模のうちに発見につとめなければならない。

こうした遮水シートの漏水について管理型廃棄物処分場では、電気的漏水位置検知システムが実用化されている。これらの漏水位置検知システムが機能するためには、

遮水シートによって処分場内外が電気的にしゃ断されていることが前提である。

一方、遮水シートの耐候性向上とブルドーザなど重機の稼働にともなう遮水シートの破損事故防止のため、海外では斜面にも遮水シート上にコンクリートや土質材料を用いた保護層を設ける例が増えている^{1),2)}。日本においても、遮水シートが廃棄物の埋め立てられるまでに生ずる材質劣化防止や遮水シートの損傷防止のためにコンクリート製保護層を設ける事例がすでに出てきている。

このような斜面部まで全面的にコンクリートや土質材料など電気を通す保護層を設置した管理型廃棄物処分場では、保護層が遮水シートの上下を接続する回路を形成するため、遮水シートが処分場内外を電気的に絶縁された条件となっている管理型廃棄物処分場を対象とした電気的漏水位置検知システムでは対応がむずかしい。

したがって、斜面部の遮水シート上に保護層が全面的に設けられた管理型廃棄物処分場においては、保護層を経由して流れる電流の影響を受けない漏水位置検知システムが望まれる。

本論文は、遮水シート上に全面的に設置された導電性の保護層を有する処分場に対応可能な筆者らが開発した漏水位置検知システムの測定原理とその性能について述べるものである。

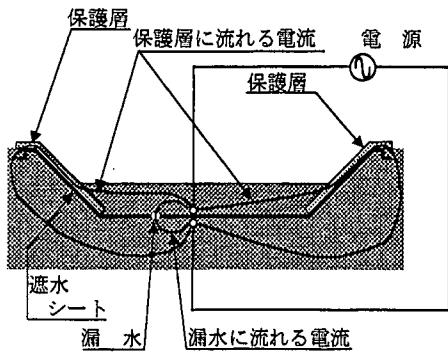


図-1 遮水シートに保護層がある処分場

2. 既往の研究とその問題点

既往の管理型廃棄物最終処分場向けの電気的漏水位置検知システムとして、電位分布を測定する方法と、電流を測定する方法と、電位傾度を測定する方法とその他の方法に大まかに分類される。

ところで、電気的漏水位置検知システムにおいて、遮水シートの漏水とは、浸出水が実際に流れていなくとも遮水シートの上下を電気的につなぐ経路と定義できる。

したがって、図-1に示す斜面部遮水シート上に設置された保護層は、保護層の厚みと処分場外の大地との接触面積の大きさから、電気的漏水位置検知システムでは、巨大な漏水に相当する。

こうした処分場の遮水シート上下が、保護層により電気的に短絡した条件において、それぞれの漏水位置検知システムの測定原理から、各検知システムが有する問題点について述べる。

(1) 電位差測定による方法

電位差測定による遮水シートの漏水位置検知方法として、鉱体流電法³⁾を応用したものが多い。これらの方法は、処分場内外に電圧を印加した状態における処分場内各点の電位測定結果から作成した等電位コンターの乱れから漏水位置を検知する方法で、古くから研究が行われている⁴⁾。現在も鉱体流電法による漏水位置検知方法^{5),6)}とこの改良技術⁷⁾について研究されている。

鉱体流電法は、非常に簡便な装置を使用するだけで、漏水位置を検知できる利点があるが、精密な測定を行う場合には、自然電位を別個に測定して、その結果を鉱体流電法の測定結果から差し引く操作が必要となる⁸⁾。

ところで、遮水シートの上下に電圧を印加した場合、漏水の部分を通じて電流が流れる点に注目すると、半無限の場に設けられた電源と仮定できる。

ここで、比抵抗が均一な半無限の広がりを有する場に

ある漏水から半径 r の位置における電位 V は、漏水から流れる電流 I と周辺の比抵抗 ρ を用いて式(1)で示される⁹⁾。

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (1)$$

式(1)からわかるように、遮水シートの保護層を経由して流れる電流の方が漏水を経由して流れる電流よりも大きいため、漏水周辺に生ずる電位異常よりも保護層を経由して流れる電流により発生する電位異常の方が大きく、漏水位置検知が非常に困難となる。

そこで、保護層を経由する電流経路の影響を受けない2重遮水シートの中間層に線電極を格子状に設置し、電位を測定する手法¹⁰⁾が提案されている。しかし、この方法は、2重遮水シートの中間層内に電気伝導度が高い浸出水が充满すると、中間層内が同電位となり測定障害をおこす。

(2) 電流測定による方法

電流測定による漏水位置検知方法として、荒井らの研究¹¹⁾がある。この方法は、遮水シートの上下に線電極を等間隔に平行に設置し、遮水シートの上下で設置方向を90°変え、遮水シート上下の電極から各1本の電極を選択し、この間に交流電圧を印加し、この間に流れる電流の大きさから漏水位置を検知する方法である。この測定システムにおいて、交流電圧を使用することによって生ずる遮水シートを介して流れる電流成分と直流成分といわれる自然電位の影響と高調波成分を位相検波回路によって除去している。この方法は、線電極の採用により、少數の電極で処分場全体がカバーできるため、処分場の規模が大きくなるほど測定システムの単位面積あたりの構築コストが低くなる特徴がある。

西山らは、遮水シートの裏面側にアルミ箔を付けた不織布を面電極とし、処分場内に設置した複数の点電極間に交流電圧を印加し、この間に流れる電流を測定することにより、オームの法則からインピーダンス分布を計算によって求め、低インピーダンス部分から漏水位置を検知する方法¹²⁾を提案している。

この方法は、インピーダンス法と称しているが、測定対象は電流であり、電流法に分類すべきものと考えられる。

これらの方法も、図-1の条件では、保護層を経由して流れる電流が、漏水を経由して流れる電流よりも大きいため、電位差測定による方法と同様に漏水位置検知が困難と考えられる。

その他に、印加電極から等距離の位置に流れる電流の大きさを比較することにより漏水位置を検知する測定方法も荒井らによって開発されている¹³⁾。

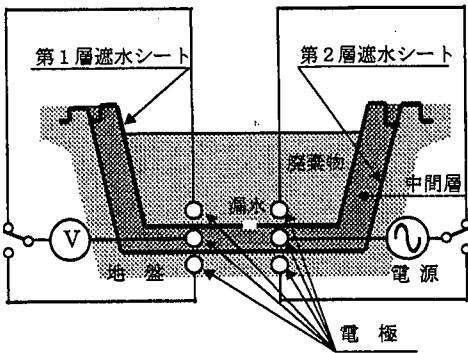


図-2 第1層遮水シートに漏水がある処分場

この方法は、印加電極を漏水周辺に近づけた条件で生ずる電流の流れのバランスを測定対象としているため、印加電極から斜面部に設置した保護層に電流が一様に流れれる処分場中央部において、漏水位置検知が可能と考えられる。

(3) 電位傾度法

電位傾度法¹⁴⁾を応用した方法¹⁵⁾⁻¹⁷⁾が、Darilek らによって開発されている。この方法は、鉛体流電法では等電位センター図から得られる漏水部周辺の電位異常を測定対象としている。しかし、漏水部周辺の電位異常を明瞭にとらえるために、350V 程度の高電圧を地盤に印加する必要があり、測定に危険がともなう。

荒井らは、等間隔に設置した多数の点電極のうち、連続する 3 つの点電極を使用し、外側の 2 本を電位傾度の測定電極とし、中央の電極を印加電極とする測定方法を提案している¹⁸⁾。この測定方法は、測定電極の設置面の裏面側に線電極を等間隔に設置して電流が流れやすくし、低電圧で十分な測定が可能としている点に新規性がある。

Darilek らの方法と荒井らの方法は、測定対象が漏水周辺の電位異常を測定対象としているため、保護層を経由して流れる電流が一様となる処分場中央部分であれば、漏水位置検知が可能と考えられる。

(4) その他の方法

2 重遮水シートの中間層という電気的にはばらつきの少ない部分に線電極を配置し、電極間電気抵抗を測定し、電極の電気抵抗が小さい部分を漏水として検知する方法が Meeleer らによって開発されている¹⁹⁾。

また、線電極を平行に配置し、この線電極にパルス電圧を印加し、電気的特性が変化する部分で生ずる反射波の極性と時間から漏水位置を検知する方法も大野らによって開発されている²⁰⁾。

これらの方針は、遮水シートの漏水によって生ずる平行する 2 本の線電極間における電気抵抗の変化やパルス電圧の反射波の極性や時間を測定対象としているため、遮水シート上下を電気的に短絡する保護層が存在しても、原理的には漏水位置を検知できると考えられる。しかし、電極設置部分を常時乾燥状態に保ち、漏水が生じて初めて電極間に異常が生ずるように管理しなければ、これらの方法による漏水位置検知は不可能と考えられる。

3. 新しい漏水位置検知の原理

最近では、図-2 のように廃棄物処分場に遮水シートを 2 重にしたり、遮水シートと粘土層などを組み合わせた構造とするよう規定されている。

ここで、図-2 に示すように、廃棄物が埋め立てられる処分場内部と中間層ならびに地盤に電極を設置した条件について考えると、中間層から廃棄物側の第1層遮水シートに電圧を印加する条件も、中間層から地盤側の遮水シートに電圧を印加する条件も、電気的には媒体となる地盤や廃棄物の比抵抗の条件が異なるだけで、電気的な境界条件は、ほぼ同一であることがわかる。

したがって、遮水シートが 1 重の処分場について、漏水位置検知方法について考えれば十分である。

(1) 電流測定

先に定義したように、漏水とは遮水シート上下を電気的に接続する経路であるから、遮水シート上に全面的に設置されたコンクリートや土質材料を用いた保護層は、電気的に巨大な漏水と同じである。また、現在の日本の一般的な管理型処分場においても、遮水シート上に全面的に敷設されている遮光用の不織布などが濡れると、土質材料などを用いた保護層と同様に、電気的に巨大な漏水が存在することとなる。また、廃棄物の搬入道路や浸出水排水管部分も、特殊な絶縁処理を講じない限り、電気的に巨大な漏水が存在することとなる。

ここで、図-3 に示す遮水シートに 2箇所の漏水がある処分場に交流電圧を印加した場合について考える。

遮水シートを介して流れる電流の経路のうち、廃棄物の電気抵抗を R_{w1} とし、地盤の電気抵抗を R_{g2} とし、遮水シートの静電容量を C とする。また、漏水を経由して流れる電流の経路のうち、2箇所の漏水それぞれの大きさに相当する電気抵抗を R_1 と R_2 とし、廃棄物が埋め立てられた部分におけるそれぞれの漏水までの電気抵抗を R_{w1} と R_{w2} とし、地盤側の電極からそれぞれの漏水までの電気抵抗を R_{g1} と R_{g2} とする。また、地盤と廃棄物層における電極周辺の電気抵抗を R_g および R_p と表記する。以上のパラメータを用いて、処分場の電気的特性は模式的に圖

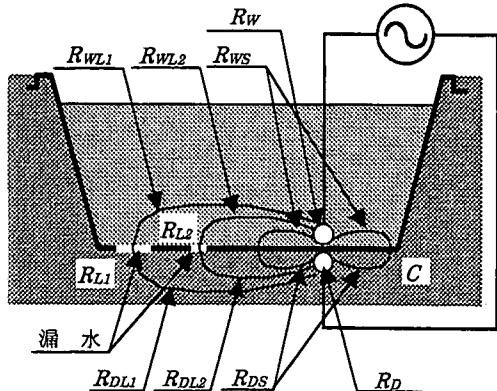


図-3 漏水のある処分場の電気の流れ

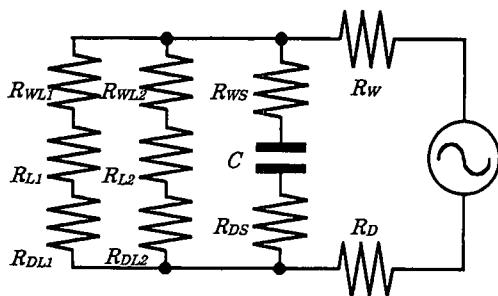


図-4 漏水のある処分場の等価回路

-4の等価回路に示される。

直流電圧の場合、絶縁体である遮水シートは、図-4に示すように交流電圧の場合コンデンサーとして示され、静電容量の大きさに応じて遮水シートを介して流れる電流成分が生ずる²¹⁾。この電流成分は、漏水を経由して流れる電流と無関係の電流成分であるため、電気的漏水位置検知にとって阻害要因となる。その他に、処分場の電気的漏水位置検知の阻害要因として、直流成分といわれている自然電流や図-5に示す電磁波の影響と考えられる高調波電流が地盤に流れている。しかし、これらの高調波ノイズや自然電流波形は、印加電圧波形とまったく異なる。遮水シートの電極間に遮水シートを介して流れる電流は、遮水シート表面の帯電と放電の繰り返しによって生ずるから、漏水を経由して流れる電流と比較して、波長は同一で位相が異なる特性を有している。

ところで、信号処理の精度向上技術として、特性が明確な信号を発信し、受信側のノイズが混入した信号から発信信号の特性に基づいて有用な情報のみ抽出する位相検波回路が広く用いられている²²⁾。この技術を用い、周波数と位相が明確な電圧を処分場内外に印加し、測定電流中に含まれる波長や位相の異なる電流成分を除去することにより、漏水を経由してくる電流を抽出して高精度

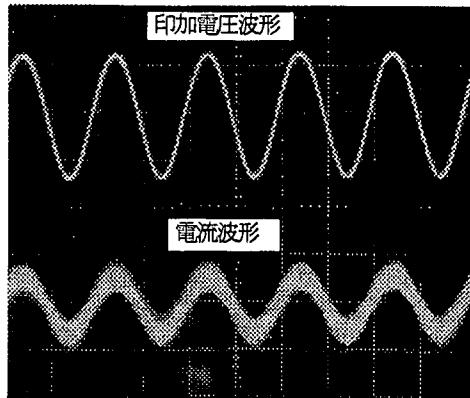


図-5 印加電圧波形と電流波形
(上段：印加電圧波形、下段：電流波形)

の測定が可能となる。

しかし、図-4の等価回路に図示したように、2箇所の遮水シートの漏水を経由して流れる電流に、大きさの違いはあるが、それぞれの電流の位相差や波長によって分離することはできない。前述のように、コンクリートや土質材料を用いた保護層は、電気的に巨大な漏水と同じである。したがって、保護層に流れる電流は、遮水シートの漏水に流れる電流と比較して格段に大きく、測定電流は保護層に流れる電流が主体であり、それぞれを分離することができないため、漏水に流れる電流を把握するのは困難である。

(2) 電場の制御

先に述べたように、複数の漏水を経由して流れる電流を、位相差などをを利用して個々の固有の電流成分として分離することはできない。このような複数の漏水が存在する場合には、漏水を経由して流れる電流のうち、印加電極周辺の漏水のみ経由してくる電流を測定し、印加電極から離れた漏水や保護層を経由して流れる電流成分が発生しないようにすれば、複数の漏水や遮水シート上下を電気的に接続する保護層が存在する条件においても漏水位置検知が可能と考えられる。

ここで、図-6に示すように、遮水シート上下に電極を複数設置した場合について考える。直流電源であれ、交流電源であれ、2本ある電源線の片側に接続した電極は、すべて同電位となる。図-6の電源の一端をNとし、他端をSとすると、スイッチcに接続された電極は電源N端の電位となり、その他の電極は電源S端の電位となる。したがって、図-6に示す漏水1の周辺の遮水シート上下は、この周辺に配置した電極により、電源S端と同電位となるから、漏水があつても電流は漏水を経由して流れない。しかし、漏水2についてみると、遮水シ-

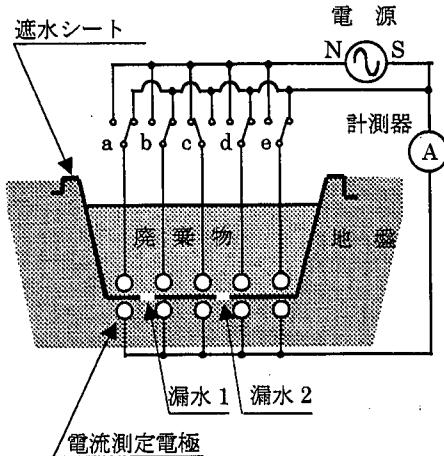


図-6 遮水シート上下の電場の制御

ト上側のスイッチcにつながる電極は、電源N端と同電位で、遮水シート下側の電極は電源S端と同電位である。したがって、漏水2周辺の遮水シート上下に、電源のN端とS端の電位差が生じ、漏水2を経由する電流成分が流れる。さらに、スイッチcを電源S端側に切り替えて、スイッチeを電源N端側に切り替えると、漏水1および漏水2の遮水シート上下の電位は電源S端の電位であるから、2つの漏水を経由する電流は流れない。このように、遮水シート上側の1つの印加電極をのぞき遮水シート上下の電場を同電位になるよう制御し、遮水シートの下側の電極に流れる電流だけ計れるよう計測器を接続すれば、複数の漏水を経由して流れる電流をそれぞれ分離して測定することが可能となる。

ところで、計測器で測定される電流には、漏水を経由して流れる電流成分と遮水シートを介して流れる電流が含まれる。しかし、遮水シートを介して流れる電流は、前述の位相検波回路により除去される。

さらに、遮水シートが有する電気抵抗に流れる電流成分を考える。遮水シートの電気抵抗は、先の筆者らの研究²³⁾において、HDPE（高密度ポリエチレン）、TPO（サーモプラスチック・ポリオレフィン）、PVC（ポリ塩化ビニル）を素材とした厚さ1.5mm遮水シートであれば、交流テスターで測ると $10M\Omega/120cm^2$ 以上で、直流テスターで測ると $200M\Omega/120cm^2 \sim 280M\Omega/120cm^2$ 以上である。一方、筆者らの調査において、供用開始後1ヶ月における処分場の浸出水の電気伝導度は、約 $3mS/cm$ であった。調査によって得られた浸出水の電気伝導度から、厚さ1.5mmで $120cm^2$ の供試体サイズの電気抵抗を計算すると、 $0.417\Omega/120cm^2$ となり、遮水シートの電気抵抗と比較すると、 10^7 以下のオーダーでしかない。したがって、遮水シートの電気抵抗を経由して流れる電流は、遮

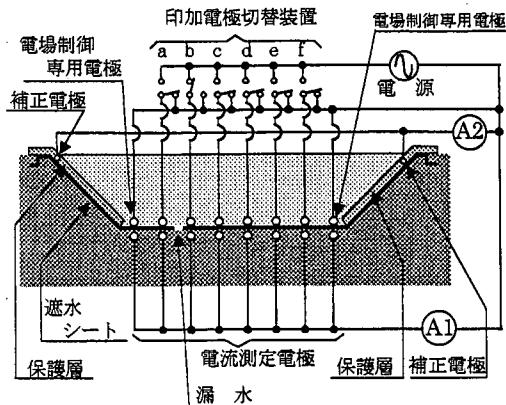


図-7 周辺への漏洩電流補正電極

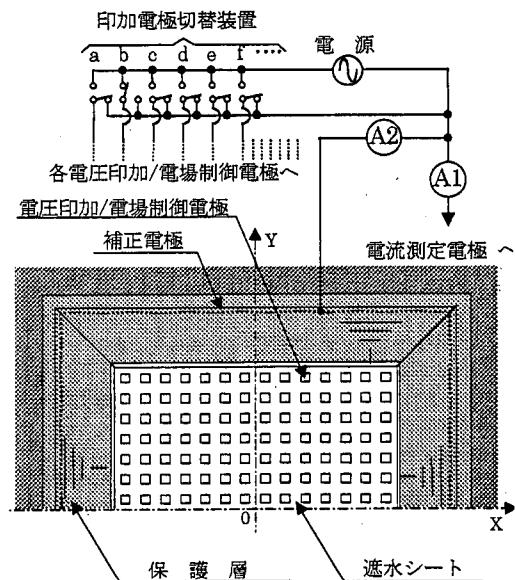


図-8 周辺への漏洩電流補正電極設置平面図

水シート上下の電場制御によって電圧が印加される範囲が狭いこともあり、測定結果に微小な影響しか与えない」と判断される。

(3) 漏洩電流の補正

前述のとおり、斜面部にも全面的にコンクリートなどの導電性の保護層が設置されると、処分場全体で遮水シートの上下が電気的に接続された条件となる。こうした電気的条件下においても、図-7に示すように、切替式の電圧印加/電場制御電極だけでなく、電場制御専用電極を遮水シート上下に設置することにより影響を除去することが可能なはずである。

しかし、保護層を経由する遮水シート上下を接続する電気経路の規模が大きく、実際には遮水シート上下に設置した電極群だけでは処分場全体の遮水シート上下の電場を完全に同電位に制御するのは困難である。したがって、電流測定電極に流れる電流には、保護層の完全に制御しきれない電場から漏洩する保護層を経由する電流成分が混入する。

そこで、図-7および図-8に示すように保護層の周辺に補正電極を設置する。補正電極の断面積は一定で、保護層が処分場外につながる部分周辺の印加電極/電場制御電極間に設置する。

図-8において、1点鎖線で表示したX軸とY軸の交差部を原点として、それぞれの電圧印加/電場制御電極をxy座標で示す。ここで、座標(xy)の電極を印加電極とし、他の電極を電場制御電極とした場合、A1の測定器で計測される電流測定電極に流れる電流を $I_{meas.}(xy)$ とし、A2の測定器で計測される補正電極を経由して流れる電流を $I_{cor.}(xy)$ とする。電流 $I_{meas.}(xy)$ には、漏洩を経由して流れる電流成分 $I_{leak.}(xy)$ と保護層を経由して流れる電流成分 $I_{con.}(xy)$ が含まれている。保護層を経由して流れる電流 $I_{con.}(xy)$ は、印加電極表面の電気抵抗、廃棄物、保護層、地盤、電流測定電極の電気抵抗が直列につながった経路を流れている。これらの直列につながった電気抵抗のうち、地盤の電気抵抗は、地盤の電気的な広がりが大きいため、電気抵抗は非常に小さいと考えられる。

そこで、「保護層と地盤との接触面における電位分布は、電流測定電極や補正電極の電位とほとんど差がない。」とする第1の仮定を設ける。

この仮定にしたがうと、保護層を経由して流れる電流 $I_{con.}(xy)$ は、印加電極の電気抵抗、廃棄物の電気抵抗、保護層の電気抵抗により決定される。

一方、補正電極に流れる電流 $I_{cor.}(xy)$ は、遮水シート上下で同電位となるよう電場を制御しているため、漏洩を経由して流れる微小な電流成分も含まれるが、基本的に印加電極の電気抵抗、廃棄物の電気抵抗、保護層の電気抵抗で決定すると考えられる。

そこで、「補正電極で測定される電流に、漏洩を経由して流れる電流成分が混入しない。」とする第2の仮定を設ける。

補正電極は、電圧印加/電場制御電極群を包囲し、処分場内外を電気的に接続する部分に沿って設置される環状の電極であるから、印加電極に近い。したがって、補正電極に流れる電流は、電流測定電極に保護層を経由して流れる電流よりも大きいと考えられる。また、補正電極に流れる電流 $I_{cor.}(xy)$ と電流測定電極に流れる電流 $I_{meas.}(xy)$ のうち保護層を経由して流れる電流成分 $I_{con.}(xy)$ は、印加電極表面の電気抵抗と廃棄物の電気抵

抗が共通で、保護層と補正電極表面の電気抵抗が異なるだけであるから、印加電極位置(xy)によって変化する電流の特性はほぼ同じで、相似となると考えられる。すなわち、補正電極に流れる電流 $I_{cor.}(xy)$ は、保護層に流れる電流成分 $I_{con.}(xy)$ の相似率nを用いて表記できる。

したがって、測定器A1とA2により測定される電流は、式(2)と式(3)によって示される。

$$I_{meas.}(x,y) = I_{leak.}(x,y) + I_{con.}(x,y) \quad (2)$$

$$I_{cor.}(x,y) = n I_{con.}(x,y) \quad (3)$$

式(3)において、印加電極位置(xy)によって変化する電流のうち、保護層に流れる電流成分 $I_{con.}(xy)$ の最大値を $I_{con,max}$ とし、補正電極に流れる電流 $I_{cor.}(xy)$ の最大値を $I_{cor,max}$ とすると式(4)で示される。

$$I_{cor,max} = n I_{con,max} \quad (4)$$

式(3)の左辺と右辺を、式(4)の左辺と右辺で割ると、式(5)を得ることができる。

$$\frac{I_{cor.}(x,y)}{I_{cor,max}} = \frac{I_{con.}(x,y)}{I_{con,max}} \quad (5)$$

式(2)の $I_{con.}(x,y)$ を、式(5)で消去し、漏洩に流れる電流 $I_{leak.}(x,y)$ について書き直すと式(6)が得られる。

$$I_{leak.}(x,y) = I_{meas.}(x,y) - \frac{I_{con,max}}{I_{cor,max}} I_{cor.}(x,y) \quad (6)$$

式(6)において、保護層を経由して流れる電流 $I_{con,max}$ は、電流測定電極で測定される電流のうち保護層の影響によって生じていると判断される電流の最大値である。

ところで、補正電極も電流測定電極において、保護層を経由して流れる電流の影響は、印加電極が保護層に近い測定範囲外周部にある条件で最も大きくなると考えられる。そこで、印加電極が測定範囲の外周部分にある条件で、電流測定電極で測定される最大電流を $I_{con,max}$ として式(6)を用いることにより、保護層を経由して流れる電流の影響を除去して漏洩部を流れる電流を測定することができる。

4. 実験

(1) 水槽

実験に使用した水槽の形状を図-9に示す。水槽は、全体形状 20m×20m の大きさで、10m×10m の底盤と周辺斜面の一部にPVC遮水シート($t=1.5\text{ mm}$)を敷設し、

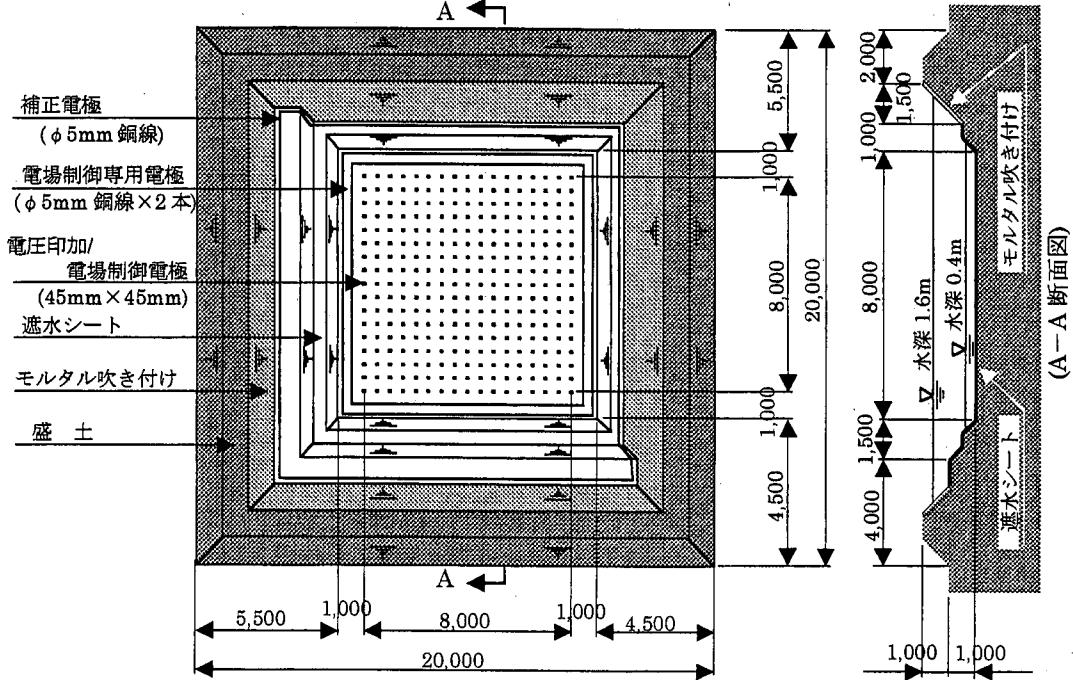


図-9 実験水槽

表-1 PVC遮水シートの電気的特性

種類	電気抵抗 (MΩ/120cm²)	静電容量 (nF/120cm²)	電極 表面状態
PVC	10以上	1.28	乾燥
	10以上	1.55	潤滑

それよりも上の斜面をモルタル吹き付けとした。遮水シートは、真砂土を敷き均した上に3枚のポリエスチル長繊維不織布（目付量 800g/m²）を敷きつめた上に敷設した。

造成した水槽斜面の勾配は1:1で、最高水深1.6mと最低水深0.4mで使用した。最高水深では、モルタル吹き付け面が水と接し、電気的に水槽内外が導通状態となり、最低水深では、水槽は遮水シートだけが水と接し、電気的に水槽内外は電流が流れない条件となる。

本実験に使用した水槽のモルタル吹き付けは、遮水シート上に吹き付けたものではなく、基礎地盤に直接吹き付けたものである。したがって、モルタル吹き付けは、遮水シートの保護層となっていない。これは、通常の縮尺モデルとすると、モルタル吹き付け層の厚みが非常に薄く、水槽内外を接続する電気経路が非常に小さくなるため、測定結果への保護層を経由して流れる電流の影響が過小評価されるためである。

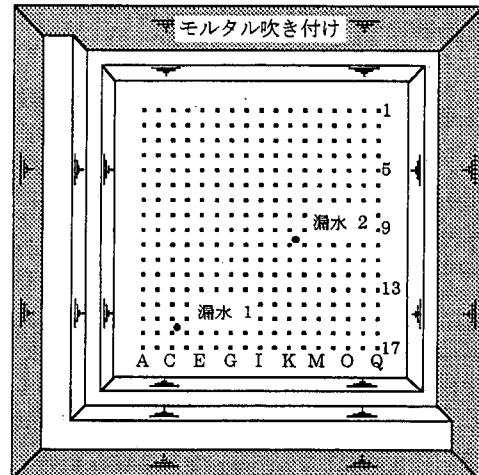


図-10 電極番号と漏水位置

水槽の水の電気伝導度は、水槽底部の濁り水が0.338mS/cm～0.347mS/cmで、表層水が0.275mS/cm～0.286mS/cmと全体でみると約0.3mS/cmであった。

水槽の材料として使用したPVC遮水シートの電気特性は、表-1に示すとおりである。この表に示した遮水シートの電気特性は、150mm×80mm(=120cm²)の2枚の金属板で試料を挟み、15kgの重量を均等にかけた条件で、

100Hz 定電流電源により測定したものである。この遮水シートの電気抵抗の測定に、直流電源を用いる一般的なテスターを使用したところ、測定限界である $280M\Omega$ ～ $200M\Omega$ の値が得られた。

本実験に使用した 1.5mm 厚の PVC 遮水シートは、一般廃棄物処分場に使用される遮水シートとして材質の点で標準的な材料とはいえない。実験に PVC 遮水シートを採用した理由は、以下に示すとおりである。

- a) E P D M (エチレン・プロピレン・ジエンモノマー) 遮水シートは、カーボン含有量が多いため、電気抵抗が小さく、測定の障害となる²⁰⁾。
- b) PVC 遮水シートの電気抵抗は、H D P E や T P O 遮水シートの電気抵抗と同等の大きさである²⁰⁾。

実験に使用した電極は、水槽底盤の中央部 8m×8m に 50cm 間隔に 45mm×45mm の銅板 ($t=0.5mm$) を 289 個 (=17×17) 電圧印加/電場制御電極として設置した。

電極それぞれの番号は、図-10 に示すように 1～17 の数字と A～Q までのアルファベットで表記した。

電圧印加/電場制御電極の周辺に電場制御専用電極として $\phi 5mm$ 銅線を 2 本配置した。電流測定電極については、遮水シート下に電圧印加/電場制御電極と同一仕様の銅板を平面的に重なるように配置するとともに、電場制御専用電極も遮水シートを挟んで同一位置に配置した。また、補正電極として、 $\phi 5mm$ 銅線を遮水シートとモルタル吹き付けの境界沿いに配置した。

(2) 測定装置

本測定装置は、所定の周期の正弦波を作る発振器、電力を增幅する増幅器、電圧印加/電場制御電極を選択する切替器、電流を検出する電流検出回路ならびに特定の位相の電流成分を抽出する位相検波回路で構成されている。

測定作業は、パーソナルコンピュータに接続した測定ユニットからの制御信号を受け、切替器が電極の切替と電圧を測定対象に印加し、測定ユニットで印加電圧と同一周波数かつ所定の位相の電流を抽出してバッファーに一時収納した後パーソナルコンピュータのデータディスクに記録される。記録されるデータは、電流測定電極に流れる電流の印加電圧の同相成分と離相成分ならびに測定器から流れる全電流である。

測定装置の出力電圧は、最大 10V であるが、測定機器の限度以上に電流が流れる場合に電圧波形が乱れるため、測定時にオシロスコープで電圧波形を確認した。実験における印加電圧は 5V で、周波数は 80Hz である。

(3) 実験条件および実験方法

実験における漏水は、水槽に敷設した遮水シートを実

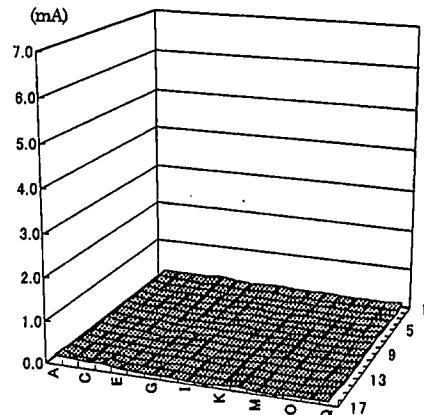


図-11 漏水がない条件の測定結果

(水深 0.4m)

際に切り取って作成した。漏水の大きさは、図-10 の漏水 1 が $\phi 200mm$ ($314cm^2$) および $\phi 50mm$ ($19.6cm^2$) で、漏水 2 が $\phi 100mm$ ($78.5cm^2$) である。漏水 1 は、実験当初に $\phi 200mm$ の大きさに遮水シートを切開して作成し、後に $\phi 50mm$ の大きさに補修した。漏水位置は、図-10 に示すように漏水 1 が 16C の近傍で、漏水 2 が 10K の近傍である。漏水の中心とそれぞれの電極の間隔は約 20cm である。

実験は、漏水の有無、水槽の内外の電気的接続状態 (水深 40cm と水深 160cm)、電場制御専用電極の本数および漏水のサイズを変えて行った。

5. 実験結果

(1) 電圧印加/電場制御電極の効果

水槽の水位を最低水深 (40cm) にした条件における漏水の有無に関する測定結果を図-11 と図-12 に示す。これらの図は、電場制御専用電極を使用せず、水槽の遮水シートの上下に設置した電圧印加/電場制御電極だけで電場制御しつつ電流測定を行った結果の立体表示である。図中の数字およびアルファベットは、図-10 の電極番号と対応する。

図-11 に示すように、漏水がない条件の測定結果の最大値は 0.20mA で、最小値は 0.02mA である。一方、漏水がある条件での測定結果のうち、最大の測定値は $\phi 200mm$ の漏水位置における 6.15mA で、最小の測定値は 0.06mA である。また、 $\phi 100mm$ の漏水位置において測定された電流は、1.63mA である。したがって、 $\phi 200mm$ の漏水位置における周辺の平坦部分との電流の差は 102.5 倍 (= $6.15/0.06$) であり、 $\phi 100mm$ の漏水位置における周辺の

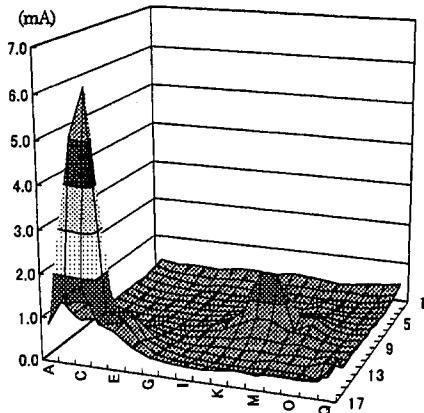


図-12 漏水がある条件の測定結果
(水深 0.4m)

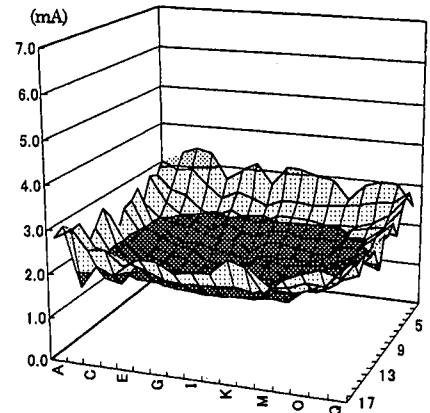


図-13 漏水がない条件の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極不使用)

平坦部分との電流の差は 27.2 倍 ($=1.63/0.06$) となった。また、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水から約 2.7m 離れた位置ではほぼ一定の電流 0.06mA となり、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水から約 2.2m 離れた位置で電流が一定となっている。このことから、漏水規模が大きくなってしまっても、漏水を経由して流れる電流は、印加電極位置がある程度離れると電流測定電極によって測定されないことがわかる。

すなわち、漏水がある遮水シート上下の電位を同一とする電場の制御を行うことにより、他の漏水を経由して流れる電流の影響を除去できることがわかる。

(2) 電場制御専用電極の効果

図-13 と図-14 に水深 1.6m、すなわちモルタル吹き付け部分が水没した条件で、電圧印加/電場制御電極だけで、電場制御専用電極を使用しないで測定した結果を示す。それぞれのグラフをみると、モルタル吹き付け面を経由して流れる電流の影響で、図-13 および図-14 とも最小電流が約 1.2mA (グラフ中央部分)、最大電流が約 3.1mA (グラフ外周部分) となっており、先の最低水深 (40cm) における測定結果のグラフと比較して、中央部の電流が小さい部分で 6 倍 ($=1.2/0.2$) の電流が流れていることがわかる。グラフ外周部分とグラフ中央部分で、測定電流が 1.9mA ($=3.1-1.2$) 大きくなっているのに対し、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水の有無で生ずる電流の増加は 0.23mA ($=2.59-2.36$) にとどまっている。この結果から、モルタル吹き付け面を経由して流れる電流の影響を低減しないと、漏水を明確に確認できないと判断できる。

図-15 は、電場制御専用電極を併用した条件での測定結果である。この図から、電場制御専用電極を用いることにより、モルタル吹き付けを経由して流れる電流を

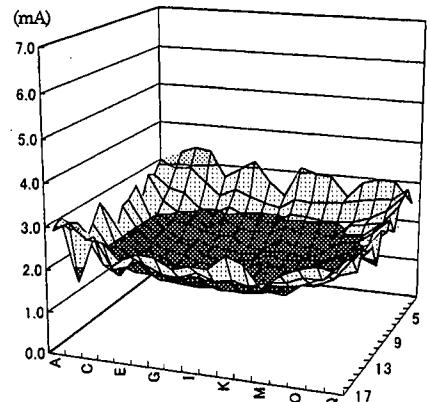


図-14 漏水がある条件の測定結果
(水深 1.6m 電場制御専用電極不使用)

0.15mA 程度に押さえることができることがわかる。また、○印で示すように漏水が 2箇所グラフから確認できるが、 $\phi 200\text{mm}$ の漏水における測定電流が 0.330mA で、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水における測定電流が 0.230mA であり、測定エリア外周部で測定された電流 0.250mA と比較すると、必ずしも大きな電流とはいえない、その他に漏水が測定エリア外周部にないと断言できない。

したがって、電場制御専用電極を使用することにより、モルタル吹き付けを経由流れる電流の低減に一定の効果を上げることができるが、電場制御専用電極だけではモルタル吹き付けを経由して流れる電流の影響を除去することが難しいことがわかる。

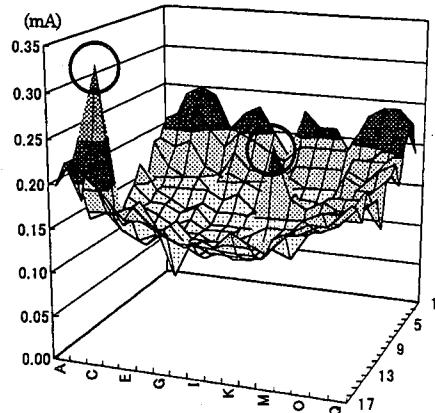


図-15 漏水がある条件の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

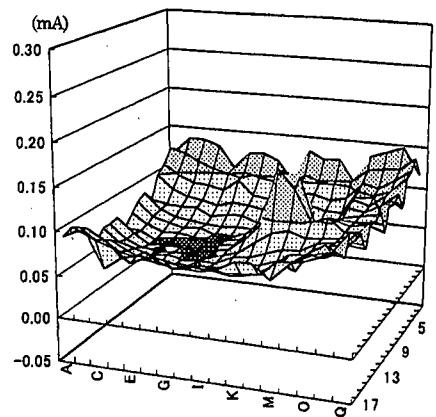


図-16 振幅前後の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

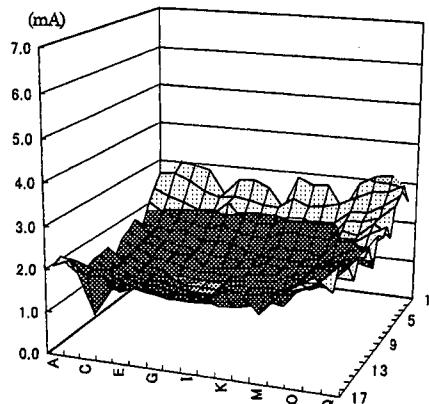


図-17 振幅電極の測定結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

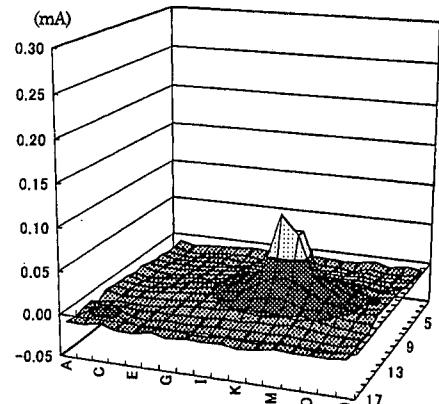


図-18 振幅電極による補正結果
(水深 1.6m, 電場制御専用電極使用)

(3) 振幅電極の効果

図-16 と図-17 に振幅電極を併用して測定した電流測定電極の測定結果と振幅電極の測定結果を示す。なお、これらの測定は、先の実験で用いた $\phi 200\text{mm}$ の漏水を $\phi 50\text{mm}$ にして行った。

図-16 に示す測定結果は、図-15 の電場制御専用電極を用いた測定結果と同様に、中央部の漏水 ($\phi 100\text{mm}$) は電流値が 0.157mA で、周辺の電流値が 0.060mA であることから明確に検知できるが、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水周辺の電流測定値が $0.057\text{mA} \sim 0.094\text{mA}$ で、測定エリア外周部で測定される電流値 $0.074\text{mA} \sim 0.100\text{mA}$ と比較してほとんど差がない、明確に漏水位置を特定することができない。

また、図-16 から、モルタル吹き付けを経由して流れれる電流成分は、振幅電極を新たに加えたことにより、図-15 に示す電位制御専用電極を用いた場合と比較して、

漏水から離れた測定エリア外周部の最大電流値で 0.250mA から 0.136mA と約半分になっているが、やはり保護層を経由して流れる電流を消去できないことがわかる。

一方、図-17 は、同一条件における振幅電極の測定結果であるが、漏水位置に図-16 のように測定エリア中央部の漏水を示す電流のピークが存在しないことと、全体的な電流の大きさが異なるだけで、測定エリア外周部のグラフの傾向が非常に似ていることがわかる。

そこで、「3. 測定原理 (3) 漏洩電流の補正」に示した式(5)を用いて補正した結果を図-18 に示す。図-18 から、図-16 では周辺のモルタル吹き付けの影響で測定エリア外周付近に見られる電流の増大が、 0mA 近辺の非常に小さな値 ($-0.005\text{mA} \sim -0.017\text{mA}$) に補正され、漏水周辺以外非常に平坦なグラフとなっていることがわ

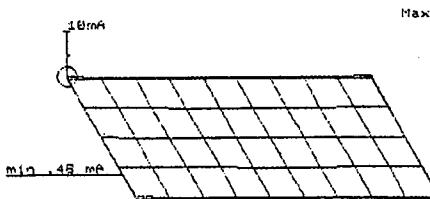


図-19 線電極を用いた検知システムの測定結果²³⁾
(電極間隔 2m, 実験開始前)

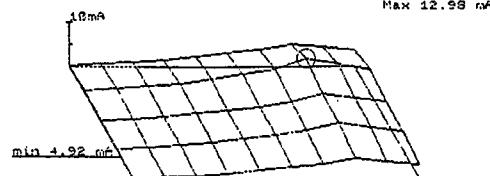


図-20 線電極を用いた検知システムの測定結果²³⁾
(電極間隔 2m, 遮水シート破損後)

かる。

図-16においては、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水部分で計測された電流の大きさが約 0.15mA で、漏水周辺で測定された最小の電流は約 0.05mA である。したがって、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水位置における測定電流から、モルタル吹き付けを経由して流れる電流の影響を除外すると約 0.1mA の電流が漏水によって生じた電流と考えられる。一方、図-18において、 $\phi 100\text{mm}$ の漏水部分における電流は 0.099mA となっており、モルタル吹き付けを経由して流れる電流を十分補正できていることがわかる。また、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水についても、補正後最大電流 0.010mA 流れるのに対し、漏水周辺では -0.005mA～-0.010mA の電流が流れしており、周辺の補正後の電流と比較して明瞭に位置を確認できる。

また、水槽が遮水シートだけで構成される水深 0.4m の実験の場合と同様に、印加電極が $\phi 100\text{mm}$ の漏水から 2.2m 離れた条件では、漏水を経由して流れる電流の影響が消え、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水から 1.7m 離れた条件で漏水を経由して流れる電流の影響をキャンセルできることがわかる。

6. 考 察

(1) 遮水シート上下の電場制御

測定対象を電流とする漏水位置検知方法には、筆者らが先に開発している線電極を採用した方法や、電流を測定した後電気抵抗（インピーダンス）に換算する方法などがある。したがって、筆者らが考案した電気的漏水位置検知方法の新規性は、先に述べたように、遮水シート上下が同電位となるよう電場を制御して電流を測定する点にある。

一般に、廃棄物処分場の遮水シートの漏水位置検知をする場合、漏水が存在しない部分において測定電流が 0 mA で、漏水付近のみ測定電流が大きければ、漏水位置を明瞭に検知することが可能となる。

ここで、電流を測定対象とする線電極を採用した電気的漏水位置検知システムについて、漏水周辺の測定データ

タ²³⁾の傾向を本測定システムの測定データと比較する。

この線電極を用いた漏水位置検知システムの実験において、図-19 に示すように漏水がない条件で、最小電流 0.48mA、最大電流 0.95mA が測定された。一方、漏水が生じた条件で、図-20 に示すように漏水箇所で最大電流 12.98mA、漏水から 14m 離れた位置で最小電流 4.92mA が測定された。

これらのデータから、電流を測定対象とする線電極を採用した電気的漏水位置検知システムは、漏水から 14m 離れても、漏水を流れる電流の影響で測定電流が約 10 倍に増加し、漏水における電流と最小の電流の比が 2.6 倍になることがわかる。また、この実験から、漏水の影響が実験土槽全体に広がっており、漏水の影響がどの程度の範囲におよぶか判断できない。

本漏水位置検知システムの一連の実験において、遮水シート部分だけに水が貯留される最低水深 40cm の条件における測定結果図-11 と図-12 が、遮水シート上下の電場を制御しない測定方法による測定結果図-19 と図-20 の比較対象となる。

漏水がない条件における測定結果は、図-11 に示すように、最大値は 0.20mA で、最小値は 0.02mA であり、漏水がある条件では、図-12 に示すように、漏水の影響がないとみられる $\phi 200\text{mm}$ の漏水から 2.7m 以上離れ、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水から 2.2m 以上離れた箇所において、最大の測定値は 0.53mA で、最小の測定値は 0.06mA である。

よって、本測定システムは、漏水に流れる電流の影響を受けても、漏水が近傍に存在しない部分では、約 3 倍

(=0.06/0.02≈0.53/0.20) しか測定電流が増加しないことがわかる。また、漏水において測定された電流と漏水から 2.7m 離れた位置における電流の比は、「5. 実験結果 (1) 電圧印加/電場制御電極の効果」に示したように $\phi 200\text{mm}$ の漏水の場合 102.5 倍で、 $\phi 50\text{mm}$ の漏水の場合 27.2 倍となっている。以上の比較検討から、

本測定方法の基本原理の 1 つである遮水シート上下の電場制御により、前述の漏水部分において大きな電流を測定し、漏水のない部分において周辺の漏水の影響を受けにくい特性を有していることがわかる。

ところで、漏水における電流値と漏水から離れた位置における電流の比は、漏水の大きさや電流が流れる媒体の比抵抗などによって異なるため、そのまま比較することができない。しかし、遮水シート上下の電場を制御することにより、一定の距離離れると、漏水の影響が他の電極を印加電極とした測定に生じないため、漏水における電流値と漏水から離れた位置における電流の比が大きくなるものと考えられる。

したがって、電圧印加/電場制御電極による遮水シート上下が同電位となるよう電場を制御する効果は、漏水を経由して流れる電流の影響を漏水周辺だけに限定する効果が大きいと判断できる。この効果は、複数の漏水が存在する条件で、それぞれの漏水を分離するのに非常に有効と判断される。

しかし、図-13と図-14に示すように、モルタル吹き付け部分が水没する水深1.6mの条件での電場制御専用電極を用いた測定結果をみると、電圧印加/電場制御電極だけでモルタル吹き付けを経由して流れる電流の影響を除去することはむずかしいことがわかる。そこで、電圧印加/電場制御電極の他に電場制御専用電極を使用した場合には、図-14と図-15の比較からわかるように、電流が1.5mA～3mAから0.15mA～0.25mAに低下することがわかる。また、図-15では、周辺のモルタル吹き付けに流れる電流の影響が大きいものの2箇所の漏水を確認できる。

現在、日本において供用されている処分場に、斜面部の遮水シートにコンクリートや土質材料を用いた保護層が設けられ例は少ない。しかし、こうした従来の処分場であっても、シートしや水工を貫通する浸出水排水管ならびに進入道路は、電気的には遮水シート上下をつなぐ電気回路を形成するため、遮水シートの漏水と同じ特性を示す。このような遮水シート上下をつなぐ回路を形成する構造物周辺に、電場制御電極をあらかじめ配置し、遮水シート上下が同電位となるよう電場を制御すれば、それらの構造物を経由して流れる電流の影響を低減できると考えられる。

(2) 保護層へ流れる漏洩電流の補正

ここで、図-16と図-17を比較すると、補正電極の測定結果である図-17では、測定エリア中央部の漏水位置で電流のピークが認められないところが異なるだけで、モルタル吹き付けの影響が大きくでている測定エリア外周部分の傾向は同じである。

これは、「3. 測定原理 (3) 漏洩電流の補正」で述べた2つの仮定が成り立っているためと考えられる。

すなわち、第1の仮定とは、「保護層と地盤との接触面における電位分布は、電流測定電極や補正電極の電位とほとんど差がない。」で、第2の仮定とは、「補正電

極で測定される電流に、漏水を経由して流れる電流成分が混入しない。」である。

そこで、第1の仮定について本研究に使用した実験水槽のデータを用いて検証する。本実験水槽に設置した多数の電極で構成された電流測定電極から、モルタル吹き付けに最も近い1本の電極について、2章の式(1)によりモルタル吹き付け位置における電位を計算してみる。式(1)に、地盤の比抵抗を粘土層の代表的な値 $5\Omega \cdot m^{20}$ 、電流測定電極に流れる電流を図-15から0.15mAとして、電流測定電極からモルタル吹き付けまでの距離2.0m～4.4mを代入してモルタル吹き付け位置での電位を計算すると0.03mV～0.06mVとなる。この計算は、1本の電極にモルタル吹き付けを経由して流れる電流が集中して流れる条件である。現実には、モルタルを経由して流れる電流は、個々の電極に分散して流れるから、モルタル吹き付け位置と電流測定電極の電位差は、先の計算結果よりも小さいこととなる。したがって、地盤の電気抵抗は非常に小さく、モルタル吹き付けにおける電位は一定と考えられる。

一方、補正電極は、モルタル吹き付けに沿って環状に配置されており、銅線であるため電位は一定である。したがって、これら2つの電流の経路を比較すると、印加電極から水の部分は共通であるから、電流測定電極と補正電極で測定される特性が非常に近くなっているものと考えられる。

つぎに、第2の仮定である「補正電極に漏水を経由して流れる電流成分が混入しない。」について考えてみると、補正電極の測定結果である図-17には漏水に相当する電流のピークは見られず、モルタル吹き付けの影響のみ測定されているように見える。

漏水を経由して補正電極に流れる電流の経路は、印加電極から漏水、地盤、モルタル吹き付け、補正電極である。先に計算したように、地盤に設置した多数の電流測定電極によって地盤の電位が電流測定電極や補正電極とほぼ同一のレベルであるため、電流測定電極群の間隙を抜けて補正電極に電流が流れないと考えられる。

保護層を経由して流れる電流の補正方法は、保護層と処分場の地盤との接続面における電位が電流測定電極とほとんど差がない状態となっていることで成立している。

したがって、こうした条件が満足されれば、処分場の形状によらず補正方法が適用できると判断される。

(3) 測定原理の普遍性

ところで、電気的漏水位置検知システムは、全て浸透流や熱伝導と同じポテンシャル理論に支配されている。したがって、電流を流す媒体の電気伝導度と印加電圧を調整することにより、実規模の処分場について模型実験結果から漏水位置検知システムの性能について推定する

ことが可能である。

本研究に使用した実験水槽は、遮水シートの厚みが1.5mmで、実処分場に敷設されている遮水シートと同じであるが、実験水槽のスケールは20m×20mとおおよそ実処分場の約1/10の大きさである。また、処分場内に埋め立てられる廃棄物は、種々雑多であり電気伝導度も一般的地盤よりも高いと考えられる。事実、筆者らの調査によれば、主として焼却灰が埋め立てられる処分場3箇所の浸出水の電気伝導度を調査したところ約3mS/cmであった。一方、本実験において実験水槽に貯留した水の電気伝導度は、約0.3mS/cmであるから、約1/10の電気伝導度である。

ここで、印加電圧5Vのままで、電気伝導度が10倍かつ実験水槽の10倍の大きさを有する処分場について考える。実験水槽の大きさが10倍の条件では、遮水シートの厚みは15mmとなるが、処分場に敷設される1.5mmの遮水シートとすると、実験と同じ周波数かつ同電圧を印加した条件では、遮水シートを介して流れる電流成分が実験の場合と比較して増えることとなる。しかし、遮水シートを介して流れる電流成分は、同波長であるが位相が90°異なり、位相検波回路により除去でき、測定への影響は軽微である。したがって、遮水シートを介して流れる電流成分について除外して考えればよい。

ところで、漏水に流れる電流 I は、電界の強さ E 、電流の流れる媒体の電気伝導度 σ 、漏水の面積 a を用いて式(7)で示される²⁵⁾。

$$I = a\sigma E \quad (7)$$

式(7)から、実際の処分場の漏水に流れる電流 I_L は、電界の強さ E_L 、電流の流れる媒体の電気伝導度 σ_L 、漏水の面積 a_L を用いて式(8)で示される。また、実験水槽の漏水に流れる電流 I_s は、電界の強さ E_s 、電流の流れる媒体の電気伝導度 σ_s 、漏水の面積 a_s を用いて式(9)で示される。

$$I_L = a_L \sigma_L E_L \quad (8)$$

$$I_s = a_s \sigma_s E_s \quad (9)$$

実験で測定された漏水の電流が測定可能な電流の大きさとすると、実処分場の漏水についても同じ大きさの電流が測定できれば、十分漏水位置を確認できると考えられる。そこで、式(10)の条件で実処分場の漏水の大きさを示すと式(11)となる。

$$I_L = I_s \quad (10)$$

$$a_L = a_s \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_L} \right) \left(\frac{E_s}{E_L} \right) \quad (11)$$

式(11)において、実験水槽と実処分場の電気伝導度の比(σ_s/σ_L)は、前述のように1/10である。また、電界の強さの比(E_s/E_L)は、印加電圧を実験水槽と実処分場

で同一とすると、実験水槽の縮尺から10となる。

したがって、式(10)は、実処分場と実験水槽の電気伝導度と電界の強さの条件から $a_L = a_s$ となり、実処分場においても、実験水槽にあけた同一のサイズの漏水についても検知できると判断される。

補正方法についても、実処分場における測定条件であっても、印加電極から地盤側に設置した電流測定電極に流れる電流と印加電極から補正電極に流れる電流は、実験水槽と実処分場の形状が同一であれば、電界の強さと電気伝導度の大きさによって決まることがある。したがって、本補正方法についても普遍的に成立つものと考えられる。

以上の考察により、個々の電圧印加/電場制御電極を実験と同様に50cm間隔に設置したり、処分場に高電圧を印加することなく、漏水位置を検知できると判断される。

(4) 実規模処分場への適用

つぎに、実験に使用した水槽の10倍のスケールアップモデルと実規模の処分場の違いを踏まえた上で、実際の処分場への適用について考える。

水槽のスケールアップモデルにおいて設置される電極サイズも同じ比率で大きくなり、45cm×45cmの大きさとなる。実験に使用した電圧印加/電場制御電極のサイズと比較すると、面積で100倍大きくなっている。地盤側ならびに廃棄物処分場内とも電極と周辺との接触抵抗が低減でき、電極面から効率よく電流が流れようになる。また、電極面積が大きくなることにより、電極面積が小さい場合と比較して個々の電極と周辺との接触条件が均一となり、測定結果のばらつきが小さくなり、漏水位置検知システムにとって測定上有利である。

また、本実験では、電流測定電極として45mm×45mmの銅板を50cm等間隔に設置したが、縮尺10倍の大きさの処分場では、45cm×45cmの電極を5m等間隔に設置することとなる。電流測定電極は、地盤側の電位を均一にし、漏水を経由してくる電流を効率よく捕捉できる機能を有すればよいから、点電極である必要は特になく、裸銅線など等間隔に設置するなどにより、さらに効果的な電極構成とすることが可能である。

つぎに、廃棄物の電気伝導度について考えると、処分場内が埋め立てられる廃棄物中の塩分などにより、実験に使用した水よりも電気伝導度が高い。したがって、実処分場内に配置する電圧印加/電場制御電極は、廃棄物中の塩分などにより電極と周辺との接触抵抗が低下するため、印加電極から電流が流れやすくなる。また、廃棄物の電気伝導度が高いために電位勾配が生じにくく、電場制御が容易となると考えられる。

ところで、処分場に埋め立てられる廃棄物の含水比や浸出水の電気伝導度にばらつきは、電位分布の乱れから

漏水位置を検知する漏水位置検知システムの場合、処分場全体の電位分布に乱れを生じさせるため、漏水位置検知の精度を低下させる要因である。

しかし、本漏水位置検知システムでは、処分場内の電気伝導度にばらつきがある場合、印加電極周辺の電位分布が乱れるだけで、印加電極周辺以外は、遮水シート上下とも多数の電場制御電極によりほぼ同じ電位に制御されるため、漏水の周辺に印加電極が存在する条件で大きな電流が測定される特性は変化しない。

一方、式(6)からわかるように、廃棄物が有する電気伝導度の大きさによって、漏水を経由して流れる電流の大きさが変化すると考えられる。このため、同一の大きさの漏水であっても、測定電流に大きな差が生じ、漏水の大きさについて精度が低くなると考えられる。

以上の考察より、本漏水位置検知システムは、処分場の規模や電気伝導度の高低やばらつきなどの条件を考慮しても、十分処分場に適用できる性能を有すると判断できる。

7. 結論

これまでに種々の測定原理に基づく漏水位置検知システムが提案されている。これらの測定システムは、一般に遮水シートの有する高い絶縁抵抗によって処分場の内外が電気的にしや断された条件で作動するよう考案されている。しかし、海外で施工実績が出てきたように、斜面部の遮水シート上にコンクリートや土質材料を用いた保護層が設けられるようになると、処分場内外が電気的に接続された状態となる。こうした電気的条件において、従来の電位の高低や電流の大きさだけを測定対象とする測定システムは、漏水を経由して流れる電流が、保護層を経由して流れる大きな電流に埋もれるため、漏水位置を確認できない。

筆者らが考案した遮水シート上下の電場を同電位になるよう制御しつつ電流測定による漏水位置検知方法は、実験から以下に示す性能を有すると結論づけられる。

- 1) 遮水シートで処分場内外が電気的にしや断された条件下では、遮水シート上下の電場を同電位になるよう制御することにより、従来の電流測定による漏水位置検知システムよりも分解能が高くなると考えられる。
- 2) 遮水シート上下を接続する保護層がある場合、電圧印加/電場制御電極だけでは、漏水位置の検知は不可能と考えられる。ただし、電圧印加/電場制御電極に加えて電場制御専用電極を併用することにより、保護層を経由して流れる電流を低減でき、漏水位置検知が可能となる。

3) 保護層周辺に設置した補正電極に流入する電流の傾向は、地盤側に設置した電流測定電極の測定結果に混入する保護層を経由して流れる電流の傾向と同じである。

4) 補正電極に流れる電流は、遮水シート上下が電圧印加/電場制御電極によって同電位に制御されているため、電流測定電極に流れる電流とは異なり、漏水を経由する電流が含まれない。

5) 地盤側に設置した電流測定電極の測定結果に含まれる保護層を経由して流れる電流は、補正電極の測定結果と式(5)により補正できる。

6) 処分場の規模と廃棄物の電気伝導度を考慮し、本実験と同じ測定電流が測定される条件で検討すると、本漏水位置検知システムは、保護層を経由して流れる電流の補正方法を含め本実験と同精度で漏水を検知できると考えられる。

7) 漏水を経由して流れる電流は、廃棄物に電気伝導度にばらつきがある場合、漏水位置の精度に大きな影響はないが、漏水の大きさの精度が低下すると考えられる。

8. あとがき

筆者らが開発した遮水シート上下の電場を同電位に制御した条件で電流を測定する漏水位置検知システムと保護層を経由して流れる電流の補正方法は、コンクリートや土質材料など導電性の保護層が遮水シートの上に全面的に設置された処分場においても、漏水位置を十分な精度で検知できるものと考えられる。

ところで、本漏水位置検知システムの性能について、点電極を用いた実験により効果を確認したが、本漏水位置検知システムの根本概念「遮水シート上下の電場を同電位となるよう制御した状態で電流測定を行う。」は、点電極だけでなく種々の電極構成にも適用できると考えられる。特に、線電極は、少数の測定電極で処分場全体をカバーできる優れた電極構成であり、本技術を採用することにより測定精度ならびにコストパフォーマンスに優れた漏水位置検知システムが実用化できると考えられる。

謝辞：本研究にあたっては、東京工業大学社会システム工学科太田秀樹教授はじめ（株）レイディックの坂田所長はじめ遠藤真一氏から多大なご協力と貴重なご助言を頂いたことに謝意を述べるものである。

参考文献

- 1) Kirschner, R. and Kreit, V.: Innovative, Protective

- Mattresses for Landfill Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 3, pp. 1015 - 1018, 1994.
- 2) Saathoff, F.: Indicators for Selection of Protection Layers for Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles Geomembranes and Related Products*, Vol. 3, pp. 1019 - 1022, 1994.
 - 3) 物理探鉱技術協会編:物理探査用語辞典, 物理探鉱技術協会, pp. 105 - 106, 1979.
 - 4) Schultz, D.W., M.Duff, B. and Peters, W.R. : Performance of an Electrical Resistivity Technique for Detecting and Locating Geomembrane Failures, Report No. EPA-600/D-84-123, 1984.
 - 5) 野口康治, 押方利郎, 川上純, 玉井直人, 金子伯男: 電気探査を用いた管理型最終処分場の漏水位置検知方法—モデル実験結果, 物理探査学会第79回学術講演会講演論文集, pp. 211 - 212, 1988.
 - 6) Nosko, V. and Andreza, T. : Damage Detection System for Testing the Integrity of Geomembranes, *Proc. of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembrane and Related Products*, Vol. 3, pp. 953 - 956, 1994.
 - 7) 島裕雅, 奥村興平, 大橋英隆, 本徳修三, 福岡晃一郎: 管理型廃棄物処分場における漏洩電流評価法による高精度漏水探査, 第5回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 383 - 385, 1994.
 - 8) 物理探鉱技術協会編:物理探査用語辞典, 物理探鉱技術協会, pp. 233 - 234, 1979.
 - 9) 物理探査学会編:図解 物理探査, 物理探査学会, pp. 216, 1989.
 - 10) 土弘道夫, 濑尾昭治, 末吉隆信, 浦満彦, 若林秀樹, 広野進: 廃棄物処分場における遮水シートの漏水検知システムの開発, 第5回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 605 - 607, 1995.
 - 11) 荒井健, 新井斉, 山崎宣悦, 波多野雅一郎: 廃棄物処分場の漏水位置検出装置, 第3回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp. 371 - 374, 1992.
 - 12) 西山勝美, 伊藤洋, 木内幸則, 古谷野直行: 処分場遮水シート機能管理システムの検知精度について, 土木学会第52回年次学術講演会論文集, pp. 448 - 449, 1997.
 - 13) 荒井健: 管理型終末処理場の漏水位置検知方法の開発, 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, pp. 236 - 241, 1989.
 - 14) 物理探鉱技術協会編:物理探査用語辞典, 物理探鉱技術協会, pp. 244, 1979.
 - 15) Landreth, R.E. :Locating and Repairing Leaks in Landfill/ Impoundment Flexible Membrane Liners, Report No. EPA/600/D-88/183, Aug. 1988.
 - 16) Darilek, G.T. and Para, J.O. : The Electrical Leak Location Method for Geomembrane Liners, Report No. EPA/600/2-88/035, Jun. 1988.
 - 17) Darilek, G.T. and Miller, L.V. : Comparison of Dye Testing and Electrical Leak Location Testing of a Solid Waste Liner System, *Proc. of the 5th International Conference on Geosynthetics*, Vol. 1, pp. 273 - 276, 1998.
 - 18) 荒井健, 新井斉, 山崎宣悦, 大即信明: 差動回路で測定した電位差による廃棄物処分場の漏水位置検知方法, 土木学会論文集, No. 602/VI-40, pp. 75 - 91, 1998.
 - 19) Meeleer, F. de: Accurate Detection and Location of Effluent Leaks Beneath Lined Waste Disposal Sites, *Proc. of the 5th International Conference on Geosynthetics*, Vol. 3, pp. 913 - 918, 1994.
 - 20) 大野文良, 佐々木潤治, 桜井仁: 最終処分場における漏水検知システム(パレス法)の開発, 第7回廃棄物研究発表会講演論文集, pp. 656 - 657, 1996.
 - 21) 西巻正郎: 電気学, 森北出版, pp. 78-92, 1975.
 - 22) 阿部善右衛門, 木下敏夫: 計測回路, 朝倉書店, 1980.
 - 23) 荒井健, 新井斉, 山崎宣悦, 大即信明: 電気的漏水位置検知に遮水シートの電気特性が与える影響, 土木学会論文集, No. 630/VI-44, pp. 27 - 38, 1999.
 - 24) 物理探鉱技術協会編:物理探査用語辞典, 物理探鉱技術協会, pp. 390, 1979.
 - 25) 西巻正郎: 電気学, 森北出版, pp. 23-24, 1975.

(2000.2.3受付)

THE LEAK DETECTION METHOD WITH ELECTRIC POTENTIAL CONTROL AND CURRENT MEASUREMENT

Ken ARAI, Nobuyoshi YAMAZAKI and Nobuaki OTSUKI

The concrete or soil protection layer, placed on geomembrane, laid over slope surface of the landfills, makes electric circuit to connect inside and outside of stock yard. In this condition, it is too difficult to search and locate the leak points of geomembrane liner by the electrical leak detection systems due to electric potential and current anomaly can't occur close by the leakage point.

Authors have developed the new electrical leakage detection method for the landfill which search leakage by current measuring under controlled electric potential field. This paper presents some principles of our electrical leakage detection system and its ability, examined by an experiment.