

最終処分場しゃ水機能管理システム(s-Can : エス-キャン)の開発 Development of a Leak Detection System (s-Can) in Final-disposal-site of Solid Wastes

金丸 信一* 田中 勉**
Shinichi Kanemaru Tsutomu Tanaka
平岡 博明*** 宮崎 啓一***
Hiroaki Hiraoka Keiichi Miyazaki
萩谷 宏三**
Kozo Hagiya

要 約

最近の環境問題に関する関心の高まりとともに、循環型社会の構築をめざす動きが出てきているが、現状では産業廃棄物の最終処分場の必要性はまだまだ大きい。最終処分場においては、しゃ水工が長期にわたってその機能を維持していることが必要であり、それを監視するとともにその機能が損傷を受けた場合には補修のためにその位置を特定することが必要となる。しゃ水機能管理システム『s-Can』は、しゃ水シートの絶縁性を利用した点電極—電流法に基づく電気的手法を用いた監視システムであり、損傷箇所の特が短時間で可能であるとともに、廃棄物層および基礎地盤の比抵抗分布の影響が小さく、周辺施設等からの電氣的ノイズによる影響を受けにくいという特徴がある。

数値解析および室内実験において、しゃ水シートの損傷の有無を検知ことができ、電極間隔の約1/6～1/10の精度で損傷位置を特定できることが分かった。本報では、同システムの紹介とともに、解析結果、室内実験結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. s-Canシステムの概要
- § 3. モデル計算
- § 4. 模型実験
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

最近の環境問題に関する関心の高まりとともに、循環型社会の構築を目指す動きが出てきているが、現状では産業廃棄物の最終処分場の必要性はまだまだ大きい。平成7年度の厚生省の発表¹⁾によると、産業廃棄物最終処分場は、全国で2,361ヶ所(6年度は2,392ヶ所)あり、その残余容量は1億4,165万³m³(6年度は1億5,091万³m³)、残余年数は全国平均で8.5年(6年度は8.7年)と前年に比べ減少している。特に首都圏においては、残余年数が4.8年(6年度は5.2年)と厳しい状態にあり、最終処分場の建設が急務となっている。

最終処分場においては、処分場内の汚水が周辺地下水中に浸出しないように、しゃ水工が長期にわたって十分な機能を維持していることが必要であるとともに、それを監視していかなければならない。管理型最終処分場のしゃ水工の構造として、平成10年6月に出された総理府と厚生省による共同命令²⁾において、透水係数10⁻⁵cm/sで層厚5mの粘土しゃ水層の機能を基準として、二重しゃ水構造とすることが規定され、①しゃ水シート+土質しゃ水層(厚さ50cm以上、透水係数1.0×10⁻⁶cm/s以下)、②二重しゃ水シート、③しゃ水シート+アスファルトコンクリート(厚さ5cm以上、透水係数1.0×10⁻⁷cm/s以下)の三つの構造が示された。しゃ水機能管理システム『s-Can : エス-キャン』(以後、s-Can)は、上記の二重しゃ水構造に対応したものであり、しゃ水シートの絶縁性を利用した点電極—電流法に基づき電氣的な手法によって、しゃ水シートの健全性を監視するものである。このシステムは測定を短時間で行うことができ、検知電極位置における電流強度の測定に基づいているため、廃棄物層および地盤の比抵抗分布の影響を受け難く、また、周辺施設等からの電氣的ノイズに強いという特徴がある。

なお、s-Canは最終処分場においてしゃ水シートの損傷時の補修を考慮したトータルシステムにおける要素技術となるものである。

* 横浜(支)道公富士宮(出)

** 技術研究所技術研究部環境技術研究課

*** 技術研究所技術研究部土木技術研究課

§ 2. s-Canシステムの概要

s-Canは電氣的絶縁体を間に挟んで電気回路を構成すると、絶縁体の絶縁性が低下しない限りこの回路は形成されないために電流は流れない（初期の過渡現象は考えられる）が、絶縁性が低下すると回路が形成され、電流が流れることを利用している。

しゃ水シートと土質しゃ水層を組み合わせたしゃ水構造に、s-Canを適用した場合を図-1に示す。この図では土質しゃ水層下部に複数の検知電極を設置し、廃棄物層内に内部電極を設けている。測定方法は、内部電極より電流を流し、各検知電極に流れた電流値を測定する。一般的に使用されているHDPEやゴム製のしゃ水シートは電氣的に絶縁体と考えられる²⁾。したがって、しゃ水シートに損傷がなければ電気は流れないが、しゃ水シートが何らかの原因で破損すると、損傷箇所を通して、内部電極と検知電極を結合する電気回路が形成され電流が流れる。電流は、抵抗が最も低い（つまり、損傷箇所以最も近い）検知電極に多く流れ、損傷箇所から離れた検知電極ほど流れ難くいため、内部電極から電流を流したときに、各検知電極において測定した電流値の分布により損傷位置を特定することができる。

図-2に二重しゃ水シート構造に適用した場合の概念図を示す。この場合には検知電極は二重のしゃ水シートの間に設置する。上部しゃ水シートの健全性は、廃棄物層内の内部電極と検知電極により評価する。下部しゃ水シートに関しては、最終処分場外部に設置した外部電極と検知電極によって評価する。上下しゃ水シートが同時に損傷した場合は、上部しゃ水シート、下部しゃ水シートを交互に測定することにより損傷位置を特定することが可能である。

§ 3. モデル計算

3-1 モデル計算方法

しゃ水シートと土質しゃ水層によるしゃ水構造において、s-Canによる漏水検知手法の可能性と検知分解能の検討を目的として、擬似3次元有限要素法を用いたモデル計算を行った。計算モデルは基礎地盤上に厚さ50cmの土質しゃ水層があり、その表面に電氣的に絶縁体であるしゃ水シートがあるととして、しゃ水シートにピンホール状の破損があると仮定した。なお、ピンホールからの漏洩電流値は1Aであるとした。基礎地盤および土質しゃ水層が電氣的に均質な場合と不均質な場合を想定し、表-1に示した条件で計算を行った。

3-2 モデル計算結果

モデル計算では、隣接する0mおよび+5m位置にある

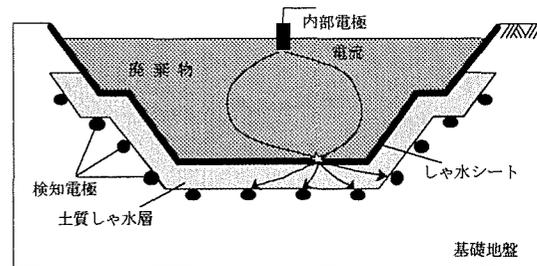


図-1 s-Canの原理

しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造

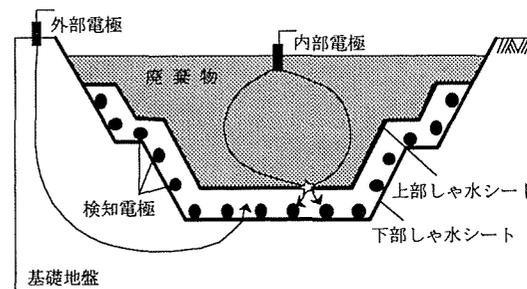


図-2 二重しゃ水シート構造

表-1 モデル計算ケース

	CASE1	CASE2
電極間隔	5 m	
電極設置位置	しゃ水シート下50cm	
土質しゃ水層と基礎地盤の比抵抗	50 Ω・m (均質地盤)	25~100 Ω・m (不均質地盤)

検知電極間でしゃ水シートの損傷位置を0m位置から1mずつ5mまで移動させた場合に全検知電極で測定される電流の分布を求めた。図-3にCASE1、図-4にCASE2のモデル計算結果を示す。図中の○は0m地点、すなわち検知電極直上でしゃ水シートが損傷している場合の電流分布を示している。□は、0m地点にある検知電極から1m離れた地点、△は2m離れた地点、▽は3m離れた地点、◇は4m離れた地点でしゃ水シートの損傷がある場合の電流分布を示している。+は5m地点、つまり隣接する検知電極直上に損傷位置がある場合の電流分布を示している。

図-3を見ると、損傷位置が0m、1mおよび2mの場合には0m位置の検知電極に流れる電流値にピークを持つ電流分布を示しており、損傷位置が3m、4mおよび5mの場合には5m位置の検知電極位置にピークが見られている。これらの2グループの電流分布形状は検知電極と損傷位置との離れに応じて互いに対称的であることが分かる。また、損傷位置が検知電極の直上に当たる0m、5m地点から離れるとともに、電流分布のピーク値が小さくなっており、ピーク値に関して左右の分布形状が非対称となり、損傷位置が検知電極位置間にあることが推測で

きる結果となっている。

図-4に基礎地盤および土質しゃ水層の比抵抗が不均質な場合の結果を示す。損傷位置が検知電極直上位置(0mおよび5m)の場合の分布形状は互いにほとんど対称的である。また、図-3と同様に検知電極と損傷位置との離れに応じた分布形状の特性が見られている。しかし、基礎地盤および土質しゃ水層の比抵抗が不均質であるため、損傷位置と検知電極位置の離れが0m位置の検知電極に近い1mおよび2mと、5m位置の検知電極に近い

3mおよび4mでの分布形のピーク強度が異なる結果となっている。

3-3 解析結果の検討

図-3および図-4に示した電流分布から、逆にしゃ水シート損傷位置を推定するため、次式によって計算値の最小二乗法によるフィッティングを行った。

$$G(x) = \frac{a}{\sqrt{b + (x - x_0)^2}} \quad (1)$$

ここで、 x : 検知電極位置、 x_0 : しゃ水シート損傷位置、 $G(x)$: 検知電極に流れる電流値、 a, b : 定数である。

式(1)において、極値を示す x の値が損傷位置を示すと考えられ、しゃ水シート損傷位置を推定した結果を図-5に示す。図中の数字は損傷位置の推定値を示している。土質しゃ水層が均質な場合では、電極間隔が5mに対して約40cm以内の誤差でしゃ水シート損傷位置を検知することができる。また、土質しゃ水層が不均質な場合でも、約50cm以内の誤差でしゃ水シート損傷位置が決定できることが分かる。

したがって、モデル計算の結果からは、土質しゃ水層および基礎地盤の比抵抗分布の不均一性(ばらつき)による検知電極での電流分布の変化は小さく、損傷位置の推定結果に与える影響も小さいと考えられ、電極間隔の約1/10の精度でしゃ水シートの損傷位置を特定できると考えられる。

§ 4. 模型実験

4-1 概要

モデル計算の妥当性を検証するために模型実験を行った。実験は広さが3m×3mで高さが30cmの土槽を用いて、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造および二重しゃ水シート構造の2種類のしゃ水構造に対して行った。計測用の検知電極は20cmピッチに格子状に100箇所に設置して、同一損傷位置に対して全検知電極での電流値を測定した。

図-6に、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合における実験モデルを示す。山砂にNa型ベントナイトを5%添加したベントナイト混合土(含水比18%)を15cmの厚さになるように締固めた後、検知電極を配置し(写真-1)、さらにその上に5cmの厚さになるようベントナイト混合土を締固めた。その上にしゃ水シートとして厚さ1.0mmの軟質塩ビシートを設置し覆土した。締固めに当たっては、ハンディタイプの比抵抗測定器によって比抵抗を測定し、約16Ω・mになるようにした。測定用の検知電極は圧着端子を加工したものをを用いた。

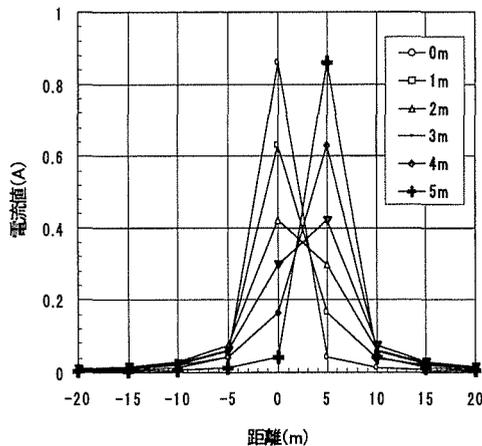


図-3 モデル計算結果-CASE1 (均質地盤)

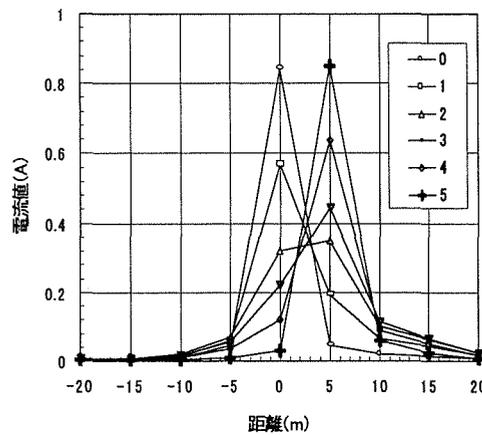


図-4 モデル計算結果-CASE2 (不均質地盤)

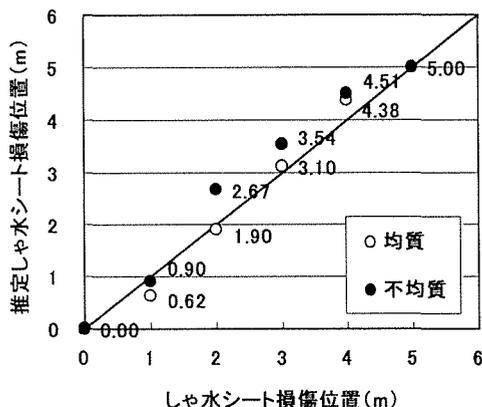


図-5 損傷位置の推定結果

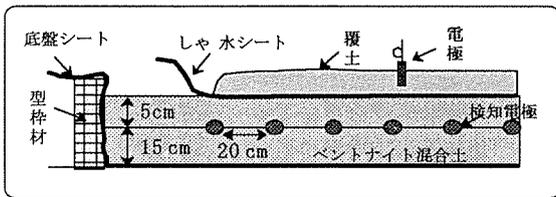


図-6 しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合における実験モデル断面図

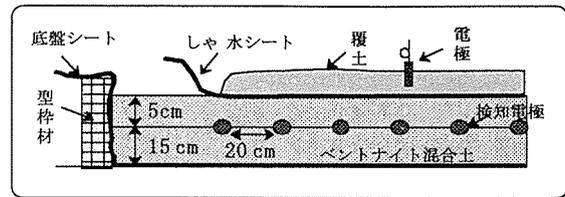


図-7 二重しゃ水シートの場合における実験モデル断面図

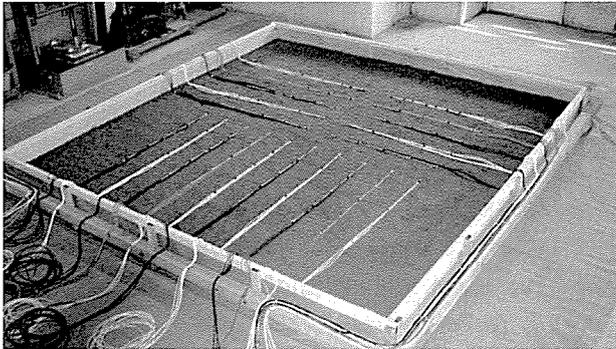


写真-1 しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造実験の電極配置



写真-2 二重しゃ水シート構造実験の電極配置

二重しゃ水シート構造の場合には図-7に示すように、厚さ15cmに締固めたベントナイト混合土の上に、しゃ水シート、不織布（厚さ10mmの反毛フェルト）の順に敷き、その上に検知電極を配置した（写真-2）。その上にさらに不織布、しゃ水シートの順に敷き、最後に覆土した。不織布は抵抗値が大きいいため、実験は不織布に均一に水を散布して行った。

表-2に実験ケースを示す。しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合にはCASE1およびCASE2について、二重しゃ水シートの場合CASE2およびCASE3について実験を行った。

4-2 実験結果

しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の実験において、しゃ水シートに生じた穴の大きさが損傷検知能力に及ぼす影響を検討した。実験（CASE1）では、ピンホール、φ1mm、φ5mm、φ10mm、φ30mmの穴をしゃ水シートに設けて損傷の検知の可否を測定した。ピンホール、φ1mmおよびφ5mmの穴がしゃ水シートに開いている場合には、検知電極では電流が測定されず穴が開いていることを検知できなかった。これは、穴が小さいことと、土質しゃ水層の含水比が小さいために余剰水分が無く、しゃ水シートの上の覆土と土質しゃ水層が電氣的に接触していないため、内部電極と検知電極との間に電気回路を構成できなかったことが原因と考えられる。図-8は同様の条件で、ピンホール部に針を刺したままで実験を行った結果である。ピンホール位置（80，100）に、明確なピークがみられ、穴の位置を特定できていることが分かる。このことから、損傷箇所穴の大きさが

表-2 実験ケース

CASE1	損傷部の穴の大きさの違いの検証
CASE2	損傷位置が一箇所の場合
CASE3	損傷位置が二箇所の場合

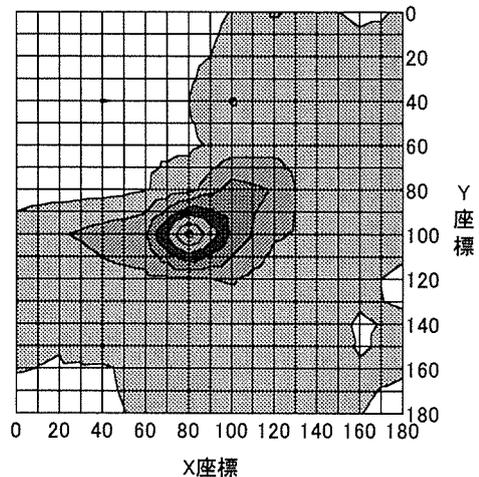


図-8 ピンホールに針を貫通させた場合
穴の位置はx=80, y=100
(しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ)

ピンホール大であっても、電気回路が形成できれば、つまり最終処分場において、しゃ水シートから漏水が生じていれば、しゃ水シートの損傷位置を特定することが可能であると考えられる。

図-8のように強制的に回路を形成させることなく、穴のみが開いている状態での穴の大きさがφ10mmの場合の電流分布の測定結果を図-9に示す。損傷位置は

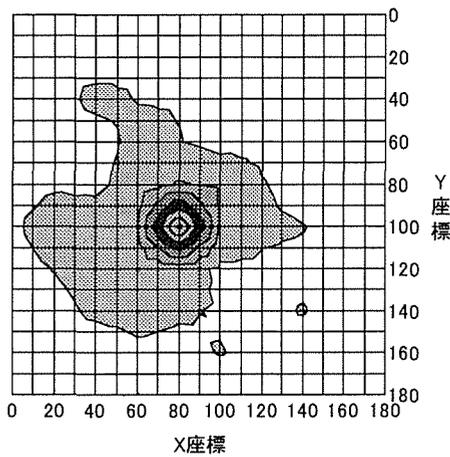


図-9 シャ水シート損傷がφ10mmの場合
穴の位置x=80, y=100
(しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ)

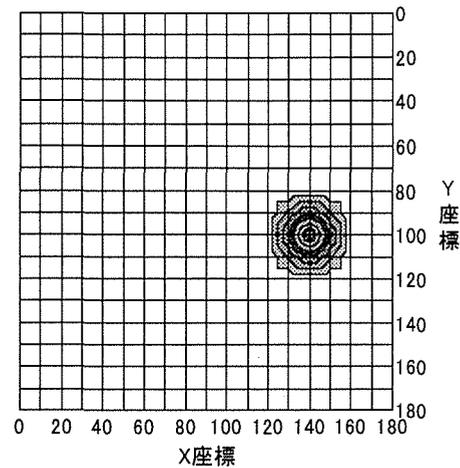


図-11 シャ水シート損傷位置が一箇所の場合
穴の位置x=140, y=100
(二重しゃ水シート構造の場合)

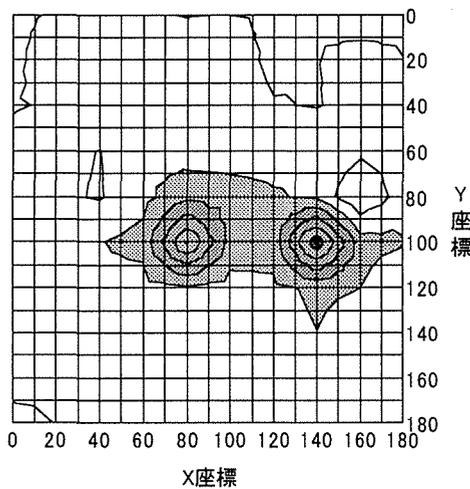


図-10 シャ水シート損傷位置が二箇所の場合
穴の位置x=80, y=100およびx=140, y=100
(しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ)

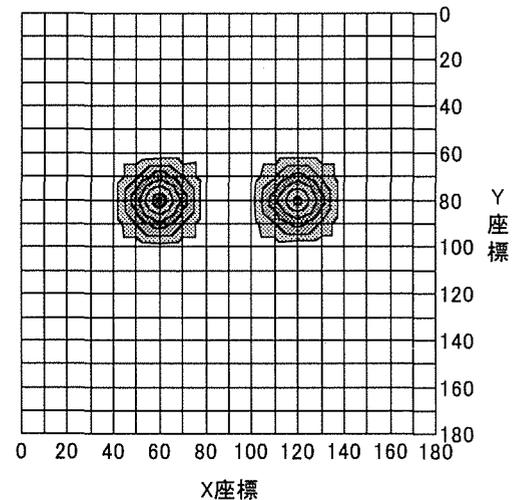


図-12 シャ水シート損傷位置が二箇所の場合
穴の位置x=60, y=80およびx=120, y=80
(二重しゃ水シート構造の場合)

x=80, y=100であるが、損傷位置に明確にピークが出ていることが分かる。損傷部の大きさがφ30mmの場合も、φ10mmと同様の傾向が見えた。しかし、電流値には大きな差異は見られなかった。このように穴の大きさが異なっても流れる電流量がほとんど変わらないことは、検出手法が電流分布を基本としていることから当然の予想される結果であり、電流測定値から損傷の大きさを推定することが困難であることが確認された。

しゃ水シートにφ10mmの穴が二箇所ある場合の結果を図-10示す。穴の位置はx=80, y=100とx=140, y=100である。(80, 100)位置での電流強度が(140, 100)位置の値よりも少し低いが、二箇所の損傷位置で明確なピーク値を示し、損傷位置が二箇所であっても、その位置を精度良く検出できることが分かる。

二重しゃ水シート構造の実験では、損傷穴の大きさはφ10mmとした。図-11に損傷が一箇所の場合を示した

が、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合と比べると、損傷部近傍の検知電極へ電流の流れが集中する傾向が顕著で、損傷位置で鮮明にピークが見られている。また、図-12に穴が二箇所ある場合の結果を示す。これも同様に、損傷位置で土質しゃ水層の場合よりも鮮明にピークが見られている。

損傷位置が一箇所および二箇所ともに、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合より、損傷位置で明確な電流強度のピーク見られているのは、電流回路を構成する媒体の違いに起因するものと考えられる。すなわち、土質しゃ水層の比抵抗は約16Ω・mであったのに対して、不織布層の比抵抗は、それよりも大きく約120Ω・m程度であったので、二重シートにおける測定結果では、しゃ水シート損傷箇所付近の検知電極へ電流が集中して流れたと考えられる。

4-3 実験結果の検討

測定結果から、しゃ水シートの損傷箇所付近に電流強度のピークが見られることが確認され、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造であっても、二重しゃ水シート構造の場合であっても、定性的にはs-Canシステムを適用可能であることが分かった。

実験で得られたデータから逆にしゃ水シートの損傷位置を推定するために、測定電流値に対して最小二乗法によるフィッティングを行った。CASE2およびCASE3の測定値にフィッティングを適用して、損傷位置を推定した結果を図-13および表-3に示す。しゃ水シート損傷位置の推定の誤差は、電極間隔20cmに対して、幾つかのデータで約6cm程度の値を示すものがあるが、しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造の場合で平均で3.15cm、二重しゃ水シート構造の場合で2.99cmであった。すなわち、平均的には電極間隔の1/6程度の精度でしゃ水シートの損傷位置を特定できると考えられる。なお、損傷位置の推定については、近似関数の適切な選定や測定データの適切な処理等によって改善できる可能性がある。

模型実験においては、電極間隔が20cmと狭いため、解析結果より誤差が大きくなったと考えられる。実際の処分場での電極間隔は5~10m程度であることが多く、電流経路の電気抵抗が大きくなるため、電流はしゃ水シート損傷位置に最も近い検知電極に流れる傾向が強まり、より解析結果に近い推定精度が得られることが期待できる。

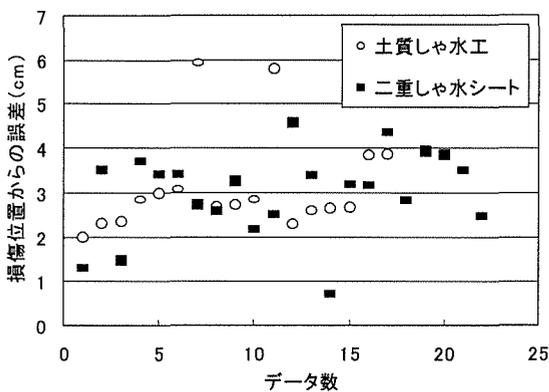


図-13 しゃ水シート損傷位置推定結果

表-3 フィッティング結果

	平均誤差 (cm)
しゃ水シートと土質しゃ水層の組合せ構造	3.15
二重しゃ水シート構造	2.99

§ 5. まとめ

本報告では、しゃ水機能管理システムについての有効性について、解析と室内実験によって確認した結果について報告した。

解析結果から本手法（点電極—電流法）が、最終処分場におけるしゃ水シートの健全性を監視する手法として十分適用可能であり、電極間隔の約1/10の精度でしゃ水シートの損傷位置を推定できることが分かった。また、模型実験での検証においては、損傷位置の推定精度が平均値として電極間隔の約1/6程度であった。今後は、実規模の実証実験を行い、システムの改良を進めていくとともに、模型実験では最も条件の悪い状態での損傷位置の推定精度が1/4程度となる可能性があったが、損傷位置推定手法を改善を行っていく予定である。

最終処分場におけるしゃ水機能の健全性の管理はこのようなシステムを設置することと、損傷等によりしゃ水機能の低下が見られた場合の対応手法とが一体となっていることが必要である。修復手法として、初期の廃棄物の埋め立て量が少ない状態では、損傷位置を特定して、廃棄物を表面から直接に除去して修復することが可能であり、最も確実性が高いと考えられる。しかし、埋め立て量が多くなった状態での修復では除去量が多くなるため、オールケーシング工法を用いた無人化工法で廃棄物層を掘削・除去し、遠隔操作により損傷位置を修復する方法を検討している。この方法では、遠隔操作で修復作業を行うため、人が廃棄物層に入ることなく、衛生的かつ安全に作業を行うことができる。

しゃ水機能管理システム『s-Can』は、しゃ水工の施工管理システムおよびしゃ水工の損傷修復システムとともに最終処分場トータルシステムの要素技術の一つとして開発を行っており、最終的には環境に対する影響の小さな最終処分場システムを目指している。

謝辞

しゃ水機能管理システム「s-Can」は、基礎地盤コンサルタンツ株式会社との共同研究の成果である。システムの開発にあたり御協力いただいた基礎地盤コンサルタンツ株式会社の酒井幸雄氏、三木茂氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) www.nippo.co.jp/jwaste1.htm
- 2) 荒井 建 他：電気的漏水位置検知にしゃ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
- 3) 環境庁，厚生省：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令の運用に伴う留意事項について，都市と廃棄物，Vol.28.No.10，pp.67-79
- 4) 金丸 信一 他：電流法による最終処分場漏水検知手法の確立，第35回地盤工学研究発表会，2000。