

動電現象を利用した袋詰脱水処理の排水促進技術

技術研究所 佐伯 博之
技術本部 土木技術第二部 杉本 昌由
技術本部 土木技術第二部 高橋 勇

概要：袋詰脱水処理工法は、ジオテキスタイル製の袋材に浚渫土等の高含水比の泥土を充填し、脱水による含水比低下と細粒分やそれらに吸着する有害物質の流出防止および処理土量の減量化を図る技術である。さらに脱水後の袋体は、袋の張力を活かし、それらを積重することで盛土材や埋戻し材として利用する工法である。一般に袋体に充填する対象土の土質性状が粘性土やシルトからなる場合、脱水時間が長時間となる。

本研究では、袋体の脱水時間短縮を図り、建設材料としての機能を早期に発揮させるための技術として、電気的手法による地盤改良技術に着目した。この方法は、粘土鉱物粒子の表面が負に帯電していることを利用して、荷電による電気浸透または電気泳動現象を誘発し、土粒子間の間隙水の排水を促すものである。本実験により、袋体への荷電は脱水促進に有利な影響を与え、排水時間の短縮に寄与する結果を得た。また、実用化に向けた荷電方法を検討し、さらに汚染土壌対策として、間隙水に含まれる陽イオンおよび陰イオン化した環境汚染物質についても有効性を見出した。

Key Words：袋詰脱水処理工法，脱水促進，電気浸透，電気泳動，イオン化，環境汚染物質

1. はじめに

袋詰脱水処理工法の脱水機構は、袋体の単体自重もしくは積重ねた上載荷重による自然・圧密排水で、土工材料として機能(強度・変形抵抗性)するためにはある程度の脱水期間を必要とする。そこで、脱水期間を短縮させて、土工材料として力学的に要求される物性を早期に実現させることは、施工速度の向上など次工程への円滑な移行とそれに伴うコストダウン効果を期待することができる。

本研究では、袋体の圧密促進工法開発の1手法として電気浸透・泳動技術に着目、その効果を確認するための試験を実施し、当該技術の適用性について検討した。

2. 試験目的

本試験の目的は、

袋詰脱水処理工法に対する電気的手法の効果の検証

電気装置導入の検討

電気的手法による圧密効果の定量的把握

の3点である。



佐伯博之



杉本昌由



高橋勇

3. 試験内容

(1) 荷電レベル確認試験(ピーカー試験)

袋体の荷電試験において「荷電レベルの設定値」を決定するため、ピーカー内の試料土に5cmの間隔を開け電極を挿入し、土粒子沈降状況を観測することにより、電位勾配と間隙比変化の関係を整理確認した。試験は、直流電流の電位勾配を 0.0, 0.6, 1.0, 2.0V/cm の 4 種類として、試験開始後 24 時間まで計測することとした。使用器具は 2,000cc ピーカーと長方形(10cm×15cm)の電極および直流電源装置である。

(2) 袋体の荷電試験

荷電レベル確認試験結果(4.(1)参照)から荷電レベルを0.0, 1.0, 2.0V/cmと設定し、袋体への荷電試験を実施した。試験体は、表-1 に示す 3 ケースで実施した。

表-1 袋体試験ケースと試験内容

	電圧	試験内容
NO.1	0.0V(0.0V/cm)	荷電なし
NO.2	12V (1.0V/cm)	袋体上面(陰極) 袋体下面(陽極)
NO.3	12V (2.0V/cm)	袋体外面(陰極) 袋体内中央(陽極)

電極には軟銅線(2mm)を使用し、これを図-1、写真-1-1、写真-1-2 のように袋材に密着させて直流電源装置により荷電する方法によった。測定は、試験開始後 1, 2, 3, 4, 5, 24 時間、その後 24 時間毎に 10 日間継続した。

(3) 使用材料

袋材; 70cm×100cm / ポリエステル(名称:T-300)
/ V=100リットル用(充填量 V=60リットル)

土質; 砂礫質粘性土[C_sGS] (図-2 参照)

$$G_s = 2.668 / W_{ini} = 47.5\%$$

$$C_c = 0.35 / p_c = 12.4 \text{ kN/m}^2$$

試験時の含水比は実施工時の作業性を考慮して

w=70%に調整した

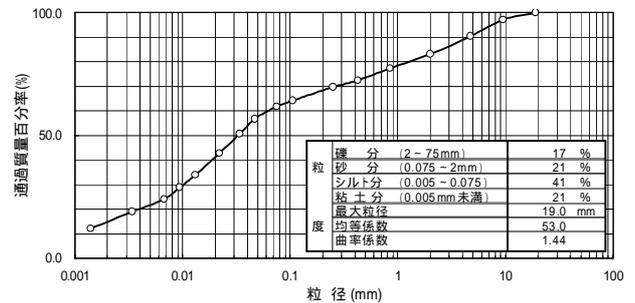


図-2 土質材料の粒径過積曲線

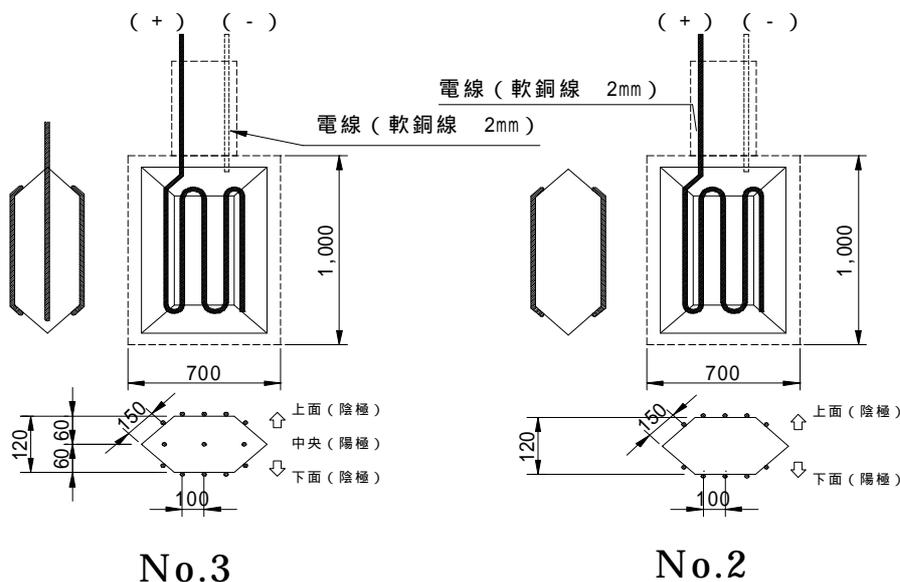


図-1 袋体の荷電試験;電極設置図



写真-1-1 袋体の荷電試験状況



写真-1-2 袋体の荷電試験状況
(乾燥防止シート養生:No.3)

4. 試験結果

(1) 荷電レベル確認試験(ピーカー試験)

図-3 に示すように、ピーカー試験から電位勾配と沈降速度には明確な相関があることがわかる。また、2.0V/cm では他の3ケースと比較して初期の間隙比の減少量が大い結果を得た。試験状況(写真-2)を観察したところ、電位勾配が大きい場合は、荷電初期に電極板に土粒子が吸着(写真-3)する様子が確認された。なお、無荷電の場合は経時的な間隙比減少がほとんどなく、荷電時には電位勾配に関わらず同程度の速さで推移する結果となった。

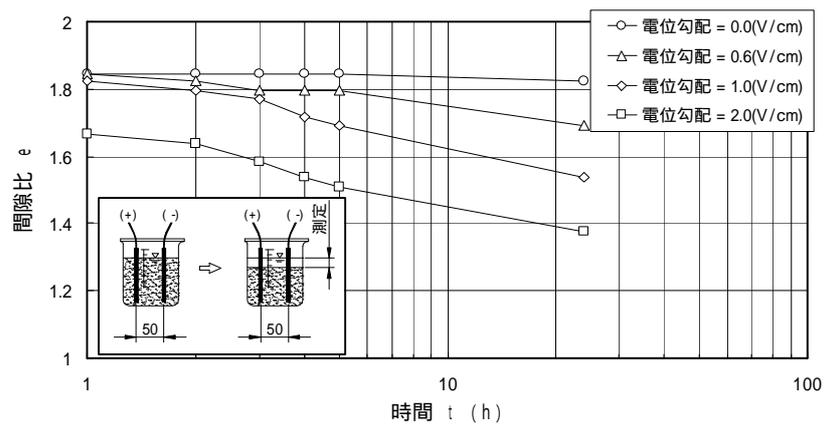


図-3 荷電レベル(ピーカー)試験結果



写真-2 荷電レベル(ピーカー)試験状況

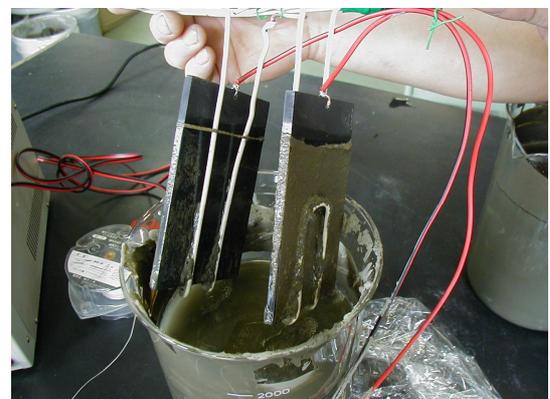


写真-3 電極板土粒子吸着状況

(2) 袋体の荷電試験

電気浸透技術の導入により、次のような結果を得た。

1) 脱水時間の短縮

図-4 は、試験開始からの経過時間と間隙比の関係を示すものである。ピーカー試験と同様、電位勾配が大きいほど脱水の促進に効果を発揮することがわかる。一方、荷電効果は時間の経過とともに低下し、無荷電の結果に漸近していく様子も見て取れた。別途実施した室内圧密試験によると、圧密降伏応力 $p_c=12.4\text{kN/m}^2$ に相当する間隙比は $e=1.472$ であり、袋体試験では 0.0V/cm 条件下で 60 時間、 2.0V/cm 条件下では 34 時間を要している。この結果から荷電することで 26 時間短縮することが可能となり、約 43%の脱水時間短縮効果があった。

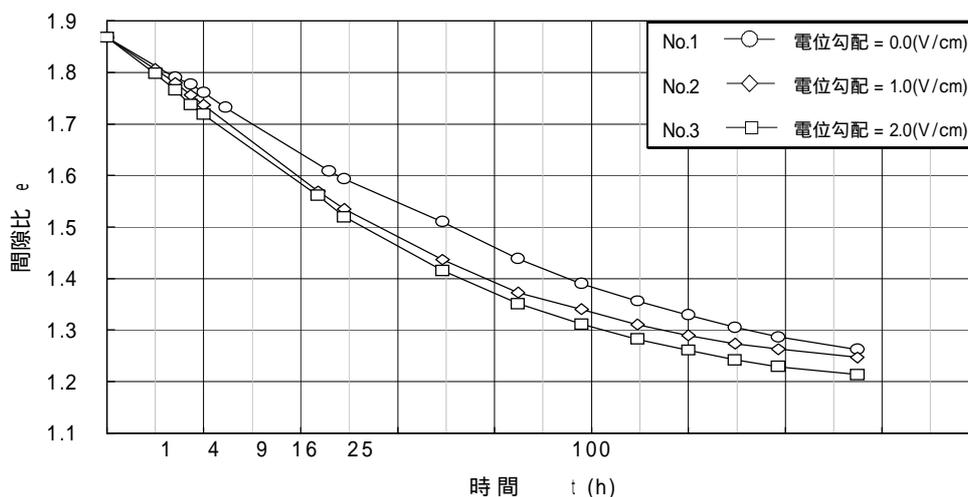


図-4 袋体の脱水試験結果

2) 荷電装置設置方法

本試験の No.2 と No.3 を比べると No.3 の方が電位勾配がより高いため脱水効果が高かった。電極設置位置が袋体中央の場合、外側に設置するより電極間距離が半分になるため同じ電圧をかけても電位勾配が 1.0V/cm から 2.0V/cm の2倍になりより有効であった。このように荷電装置を設置する位置によって同じ電圧をかけても効果の違いがある。このように、荷電装置をどこに設置するのかは、実施工では大変重要である。

また、今回の試験から荷電効果をより高めるための荷電装置設置方法として、以下のことを考慮する。

- a) 電圧の絶対値を高くする
- b) 電極間距離と電圧値の相対関係に起因する電位勾配を高くする
- c) 荷電中の電流値の低下を防ぐ

3) 圧密・脱水効果の確認

(1) 圧密・脱水効果確認方法

電気浸透技術適用の効果と圧密量の定量的把握のため以下の方法を採用した。

i) 荷電の有無による圧密速度の比較

- a) 荷電する場合(2 ケース)とそうでない場合(1ケース)の試験袋体を作製して、時間 - 圧密量の関係を調べた。
- b) 電圧の違いによる圧密・脱水量の差を調べ、電気浸透技術のより有効な適用手法について検討する資料を得た。

ii) 圧密・脱水終了時点または進行段階における圧密度および等価な先行圧密応力の試算

- a) 一次元圧密試験(室内試験)により対象土の圧密特性を調べた。
- b) 袋体の試験結果より各測定時の間隙比を算出し、袋詰脱水過程における圧密度や等価な先行圧密応力などを試算した。

(2) 圧密・脱水効果結果

図-4 は、間隙比(e)と時間(t)の関係を $e \sim t$ で表したものである。

図-4 より、最終的な間隙比の減少量は $e=1.26 \sim 1.21$ 程度となり、電圧勾配が大きいほど圧密もしくは脱水が促進されていると考えられるが、荷電時間の経過と共に荷電効果低下していることがわかる。また、図中の曲線に関して試験初期の勾配を見ると、荷電している No.2,3 が同程度で No.1 より大きい。一方、時間の経過とともに曲線勾配は緩やかになり、No.3 No.2 No.1 の順で勾配が収束していく。さらに、No.1 と No.2 は最終的に同じ間隙比レベルに漸近していく。

(3) 電流値の変化

図-5-1 は、電流値(I)と時間(t)の関係を $I \sim t$ で表したものである。図から明らかなように、時間とともに電流値は低下している。したがって、圧密や脱水に寄与する下限電流値レベルがあると仮定すると、自ずと荷電効果が有効に働く範囲が想定できる。このことは、実際の施工に電気浸透技術を導入する場合、対費用効果を求めるに当たっての重要な指標となる。参考のため、間隙比及び含水比の変化と電流値の関係を図-5-2、図-5-3 に示す。

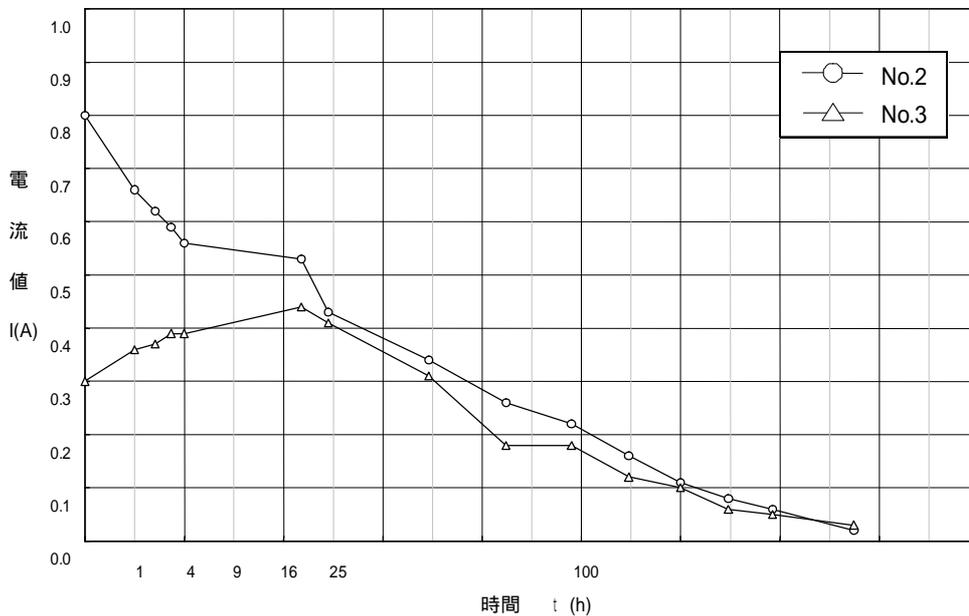


図-5-1 電流値(I) ~ 時間(\sqrt{t})の関係

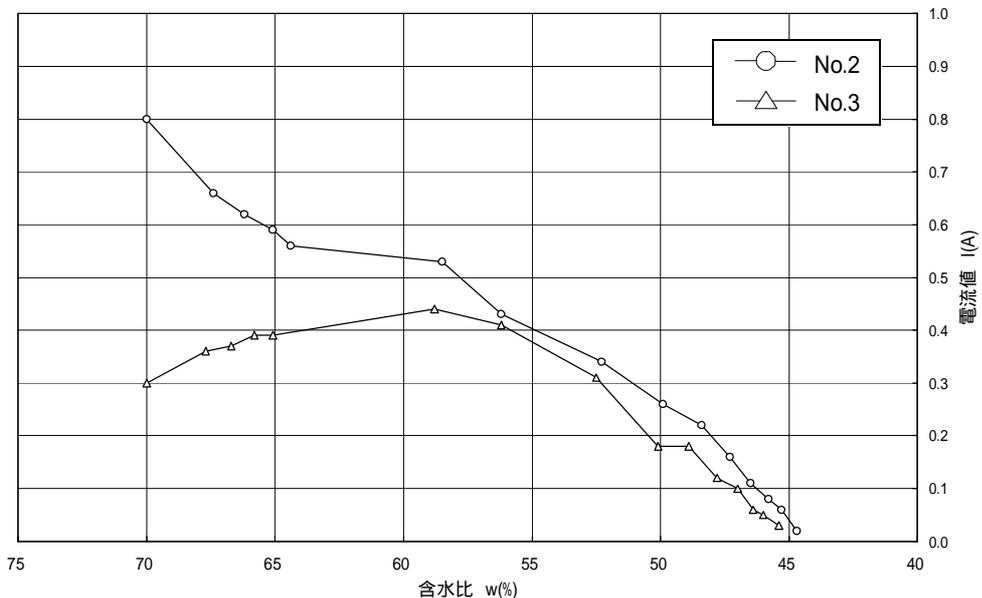


図-5-2 電流値(I)と含水比(w)の関係

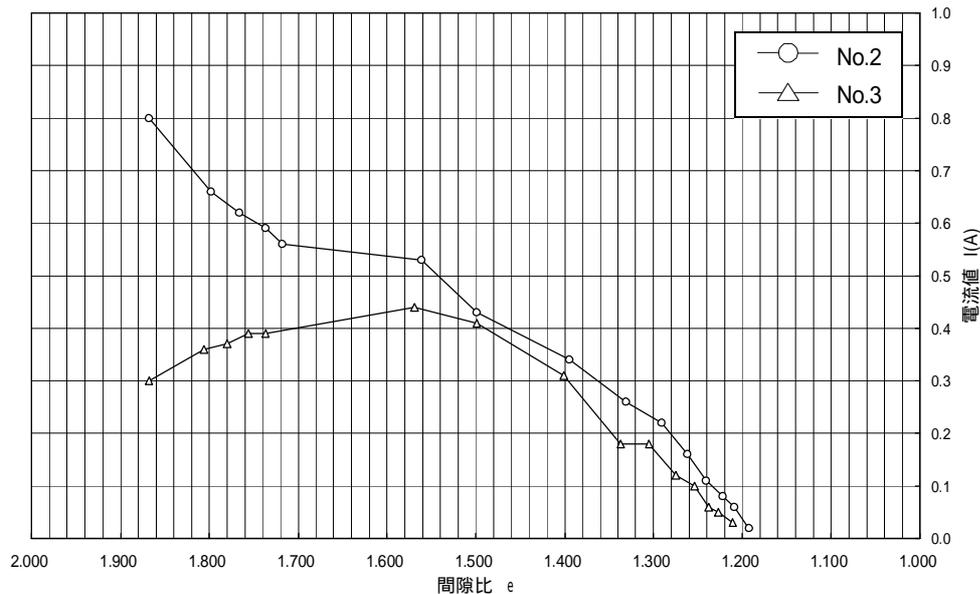


図-5-3 電流値(I)と間隙比(e)の関係

(4)土の段階載荷による圧密試験と他の土質試験

試験に使用した土質材料について改めてその性状を調べた。本試験は、標準圧密試験方法に則って実施したため、供試体寸法を考慮して2mmふるい通過試料とした。

粒度組成(図-2)を見ると細粒分が60%以上であり、粘性土に分類される。また、段階載荷による圧密試験から圧密降伏応力(p_c)を求めたところ、 $p_c = 12.4$ (kN/m²)であった。

圧密試験の結果によれば、透水係数が $10^{-7} \sim 10^{-9}$ (cm/s)オーダーの数値を示した。また、一次圧密量を t 法により求めると、一次圧密比が0.3~0.6程度となり、比較的二次圧密が卓越する結果を得た。

5. 今後の技術的課題

袋詰脱水処理工法への電気浸透技術の適用性を検討する目的で、ピーカー試験、袋体の脱水試験および材料の室内土質試験を実施した。試験結果を前節までに示したが、本検討から明らかになった事項と、より有効に実用化するための技術的課題について列挙する。

高含水状態の粘性土材料に正負の電極板により荷電した場合、土粒子は正の電極板に吸着するような挙動を示す。

荷電電圧(電位勾配)が大きいほど脱水や圧密もしくは粒子移動に与える影響が大きい。

荷電による脱水・圧密・粒子移動は、現象の進行に伴って土構造の電気抵抗が上昇し電流が流れにくくなる。そのため、時間と共に荷電効果が低下する。

電流の低下について、袋体表面の乾燥状態や電極の設置状況に起因するところが少なからず影響を与える。

袋詰脱水工法に使用する土質材料は、高含水でいわゆる泥状材料が対象であること、排水機構が三次元的であるなど複雑な要因が内在することなどの理由により、単純な一次元圧密モデルによる評価が難しい。したがって、計画段階における施工数量や減容量および養生期間を定量的に把握しようとする場合、計算手法の構築が必要である。

6. まとめ

今回の研究成果から袋詰脱水処理工法への電気浸透・泳動技術の導入効果は大変高いことが実証された。実用化に向けて次ぎのことが言える。

工程短縮

約 43%の脱水処理時間の短縮効果があったことから、袋詰充填開始から搬出・積上(盛土やのり面保護など)までの脱水期間を大きく短縮することが可能となった。特に今後需要が予想される都市河川の浚渫現場の様に脱水養生ヤードがほとんどなく早期脱水・運搬搬出が必要な場所の場合、この電気脱水手法を活用することは大変有効である。

今後、この試験に用いた袋体よりもより大型な袋体に適用した場合、スケール効果から短縮日数も拡大することが予想される。さらに袋詰脱水処理工法施工時において、二次以降の充填方法を繰り返す施工フローを想定すると、さらに大きな効果が期待できる。このことより、工程やコストにメリットを見出せることが実証された。

荷電装置

荷電装置導入方法として

- a) 「袋素材織り込み方式」: 電極(電線等)を袋の素材に直接織り込む方法
 - b) 「外巻き荷電シート方式」: 予め電線を内装した荷電シートを荷電装置として準備し、充填完了した袋体に巻付もしくは覆う等して、これに直流電流を流す方法
- 等が考えられる。b)の「外巻き荷電シート方式」は袋体材料に内装する製造コスト増を回避することができ、荷電シートのバリエーションで袋体種類にも対応できる。また、袋体脱水ヤードでの作業が可能のため、別途荷電ヤードを設ける必要がないので、コストと耐久性の面から「外巻き荷電シート方式」は、より有効であると思われる。

汚染土壌対策

従来の袋詰脱水処理工法は間隙水のイオン化した環境汚染物質に対しては封じ込め効果が少なかった。今回の電気泳動技術を利用することで、重金属汚染土の袋詰脱水処理工法への適用性がより有効になった。適用方法としては

- a) 脱水過程で汚染物質を強制的に溶出
- b) 充填過程で汚染物質を袋内に定着させる方法

の 2 つのことが可能になる。a)は、袋体内を汚染物質の溶出促進環境にし、排出水を回収・浄化して排水しようとするものである。b)は、充填前の土質材料に化学的な安定処理を施して袋詰を行い、その後の溶出を抑制しようとするものである。汚染地盤対策での封じ込め機能を有する袋詰脱水処理技術の適用分野を検討する上で、重金属等の汚染物質不溶化技術として電気的手法は有効な技術となりうる。

以上のことから、今後、実用化に向け、実工事レベルでの袋体実証実験を実施しながら安全性、経済性を追求し、当社の環境コア技術として研究開発していく所存である。

謝辞

本研究の実験にあたっては、(株)ガイテックの森郁夫(工学博士)氏、尾崎健一郎氏、大和基礎設計(株)の方々にご貴重なお言ご支援を頂いている。これら関係各位に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松尾新一郎:土質安定工法便覧,日刊工業新聞,P473,昭和 57 年
- 2) 和田信一郎:電気泳動・電気浸透による有機無機複合汚染土壌の浄化技術の基礎付け(平成 11 年度~平成 13 年度科学研究費補助金 研究成果報告書),平成 14 年 3 月
- 3) (財)土木研究センター:発生土利用促進のための改良工法マニュアル,建設省大臣官房技術審査室 監修,平成 9 年 12 月
- 4) 独立行政法人土木研究所:材料地盤研究グループ(土質),袋詰脱水処理工法による高含水比ダイオキシン類汚染底質・土壌封じ込めマニュアル,土木研究所資料 第 3902 号,平成 15 年 7 月