

既存産業廃棄物処分場の地中加熱による地盤改良・修復技術 に関する基礎的研究

高橋 浩

藤山 哲雄

前田 和享^{*1}

石黒 健

要 旨

近年の産業廃棄物処分量の増大に伴って、埋立てが完了し満杯となる処分場が増加しているが、処分場廃止後の有効利用に際しては、地盤強度の不足と廃棄物に含まれる有害重金属の溶出の問題が課題とされている。本研究では、既存処分場に対して原位置にて、セメント添加や締固めを行うことなく、地盤強度の増加と有害物質の不溶化を行う工法について基礎的検討を試みた。本工法は、産業廃棄物の焼却灰に含まれる酸化カルシウムと水の水和反応による自硬作用を地中加熱により促進させ、加熱固化による強度増加と有害物質の不溶化を図るものである。室内での要素試験および大型土槽実験により本工法の有効性を定性的に確認するとともに、施工法とコストに関する概略の試算を行って工法の実現性を確認した。

キーワード 産業廃棄物／既存処分場／加熱固化／強度増加／地盤改良／有害物質／不溶化／余剰電力

目 次

- | | |
|-------------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 大型土槽実験による加熱効果の検証 |
| 2. 地中加熱工法の概要
と研究フロー | 5. 施工法の検討とコスト試算 |
| 3. 小型供試体を用いた
加熱効果の検証 | 6. おわりに |

A STUDY ON THE GROUND IMPROVEMENT BY HEATING IN THE GROUND OF INDUSTRIAL WASTE LANDFILLS

Hiroshi TAKAHASHI
Kazuyuki MAEDA

Tetsuo FUJIYAMA
Takeshi ISHIGURO

Synopsis:

Recently, a large number of industrial waste landfills become to be full because the amount of industrial waste increases. It is difficult to utilize this waste landfills because of it's low strength and heavy metals included in it.

In this paper, a method for ground improvement of in-situ waste landfill by heating in the ground is suggested. The validity and the feasibility of this method are verified by the laboratory test and the feasibility study.

* 1 本店 土木設計部

1. はじめに

近年の産業廃棄物処分量の増大に伴い、埋立てが完了し満杯となる処分場が増加している。処分場が満杯となった後の跡地利用、有効利用に際しては、地盤強度の不足と廃棄物に含まれる有害重金属の溶出の問題が課題として挙げられる¹⁾。処分場埋立て材料の多くは、減容化のために廃棄物を焼却処理した焼却灰であるが、例えば焼却炉より排出されたばかりの新生灰に対してはセメントや薬液による固化処理、あるいは高温焼成によるスラグ化等により地盤の強度増加や重金属の不溶化を図ることが可能である。一方、既に埋立て処分された後の既存処分場に対しては、大規模な地盤掘削や構外搬出、焼却灰の不溶化・無害化、そして再度の構内搬入と埋戻し、といった複雑なプロセスが必要となり、環境面、あるいは仮置き場の用地確保やコスト面で大きな負担となってしまう。本研究は、このような背景から、既存処分場の地盤強度の増加と有害物質の不溶化を原位置にて、効率的、経済的に実施するための工法について、基礎的な検討を試みるものである。

なお、廃棄物焼却灰は事業所からの廃棄物を焼却した一般産業廃棄物焼却灰（以後、一般灰）、下水汚泥の焼却灰、あるいは火力発電所より排出される石炭の焼却灰（石炭灰）など多種多様であるが、本報告では試料の入手の容易さから、火力発電所の石炭灰を主体とし、一部一般灰も入手して実験に供した。

2. 地中加熱工法の概要と研究フロー

産業廃棄物の焼却灰には、カルシウム成分（酸化カルシウム CaO ）が含まれている。一般灰の場合、焼却時の脱塩素処理のために、水酸化カルシウム等を廃棄物に添加して焼却するため、特に CaO の含有率が高い。石炭灰や焼却灰が適度な水分を保有する場合、このカルシウム成分と水がポズラン反応を生じ、経時的に強度が増加する（自硬作用）ことが報告されている²⁾³⁾。締固めた石炭灰を対象とした既往の検討事例を参照し、強度発現に影響を及ぼすと考えられる因子を列举した結果が表-1 である。

表-1 強度発現に影響を及ぼす諸要因

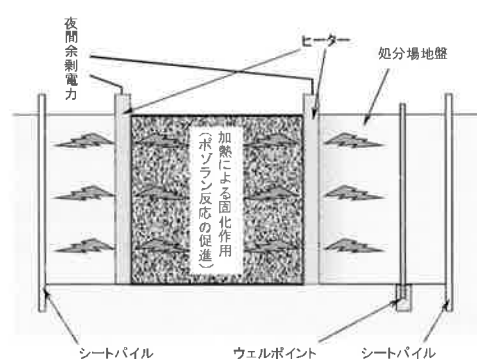
弱	←	強度	→	強
Ca 貧	←	化学組織	→	Ca 富
低	←	密度	→	高
乾燥、飽和側	←	含水比	→	最適範囲
短	←	養生期間	→	長
低	←	養生温度	→	高

*人為的に調整可能な要因として今回取り上げたものをハッチングで示した。

締固めた石炭灰の強度は、含水比が乾燥側、完全飽和の間の適度な範囲内にあり、かつ密度が高いほど大となる。また、灰種ごとに異なる化学成分、例えばカルシウ

ム成分の含有率等の違いの影響を強く受ける。山田・佐藤⁴⁾はさらに、養生温度が高く、養生期間が長いほど強度発現が顕著となることを報告し、両者の積で現される積算温度と強度の関係を議論している。これらの影響因子と既存処分場の現場条件を併せ考えると、原位置に廃棄された焼却灰に対して人為的に調整可能な因子は、まず密度（締固めやプレート）、含水比（地下水位低下等による不飽和化や加水による含水比調整）の2つと考えられる。一般産業廃棄物処分場の強度増加を目的として地下水位の低下を図った事例は見られないが、前者の密度についてはサントコンパクションパイル（SCP）工法、プレート工法により石炭灰処分場の密度増加を図った施工事例が報告されている⁵⁾。これ以外にも、セメントを添加して固化する深層混合処理工法等を用いれば、焼却灰の改良強度を確実に高めることが可能であろう。一方、SCP 工法や深層混合処理工法等の既存工法は、大型の施工機械を用いる必要があり、施工規模によっては工期、工費が甚大なものとなる場合がある。

本研究では、人為的な調整が可能なおうひとつの因子、「温度」を取り上げる。現地の焼却灰がカルシウム成分と水分の両者を含有する（一般的には、飛散防止の加水のため、現地の焼却灰は適度の不飽和状態にある）ことに着目し、これに原位置で熱を加えることによりポズラン反応を促進させ、熱固化に伴う地盤強度の増加と重金属の不溶化を期待するものである。本研究で提案する地中加熱工法の概念図を図-1 に示す。原位置の既存処分場に熱源となる棒状ヒーターを貫入設置し、通電する。非閉鎖型の海面処分場では飽和状態にある焼却灰の不飽和化（締め切りと水位低下）を図ることが望ましいが、これ以外の場合、焼却灰は不飽和状態にあるため加熱工程のみを行えばよい。初期の熱源設置が終了すると、以降はほぼ無人化施工、かつ無振動・無騒音の施工が可能となる。使用する電力は、安価な夜間余剰電力を想定している。



*) シートパイル、ウェルポイントは非閉鎖型海面処分場の場合のみ必要

図-1 工法概念図

本工法の有効性を確認するために、以下に示すフローに従って研究を実施した。

① 小型供試体を用いた室内試験

密度、含水比、養生温度等を変えた小型供試体を作製し、加熱履歴による一軸強度特性や有害物質の溶出特性の変化を確認する。

② 大型土槽実験

実処分場を再現した模擬地盤を大型土槽内に作製し、加熱工法をモデル化した模型実験により提案工法の効果を定性的に確認する。

③ 施工法検討とコスト試算

実機レベルでの施工法検討やコスト試算を実施し、工法の実現性を確認する。

3. 小型供試体を用いた加熱効果の検証

3.1 加熱による焼却灰の強度増加促進効果

(1) 実験方法および実験条件

産業廃棄物焼却灰として、火力発電所から排出される石炭灰および一般灰を準備した（石炭灰については、カルシウム含有量の異なる複数の試料を使用）。

実験では、上記の試料を $\phi 50\text{mm} \times h100\text{mm}$ の鋼製モールド内に乾燥密度と含水比の組み合わせを種々に変えて締固め、供試体とした。含水比が変化しないようにモールドをラップした後、恒温槽の中で所定の加熱履歴（加熱温度と養生期間）を加えた。その後脱型、水浸飽和させた後（石炭灰海面埋め立て処分場における再飽和化を想定）、一軸圧縮試験を行った（歪み速度0.1%/min）。

表-2に実験条件の一覧を示す。

表-2 実験条件一覧

試料	養生温度(℃)	養生期間(日)	密度(t/m^3)	含水比(%)	CaO含有量(%)
石炭灰	15(常温)	0	1.0	0	0.8~10.8
	40	3	1.1	10	
	60	7	1.2	20	
	80	14	1.3	30	
		28	1.4	40	
一般灰				58(飽和)	
	60	7	0.9	60	25
		28			

(2) 加熱履歴を受けた石炭灰の一軸圧縮強度特性

海面投棄型の石炭灰処分場では、造成地盤は飽和かつ極めて緩い状態で堆積している。これに相当する飽和緩詰め供試体の一軸圧縮試験結果を図-2に示す。

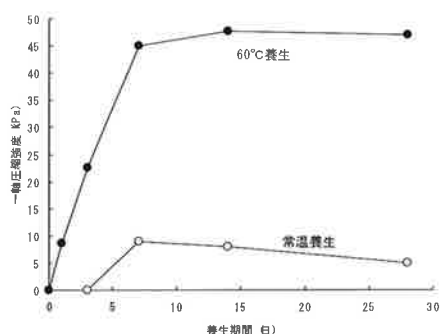


図-2 飽和供試体の強度発現

図は、乾燥密度 $\rho d=1.0\text{t}/\text{m}^3$ (相対密度 $D_r=39\%$) の飽和供試体を常温(15℃)および60℃の恒温下で養生した際の強

度発現特性である。常温供試体では一軸圧縮強度は10kPa (供試体自立の限界) 程度でほとんど強度発現を示さないが、60℃養生の場合、その5倍程度の値を示している。例えば、セメント添加により若干の粘着力を与えた砂が液状化を生じない限界 q_u 値は50~100kPaとされており⁶⁾、飽和状態の原位置処分場をそのまま加熱しただけでも、液状化対策としての目的を達成できる可能性がある。

今井ら⁷⁾は、石炭灰の自硬性が適度な含水状態のもとで発揮され、完全飽和および乾燥側では強度発現が阻害されることを報告している。そこで、不飽和状態(含水比 $w=30\%$ 、飽和度 $S_r=52\%$)の供試体に対する結果を図-3に示す。図中には図-2の飽和供試体の結果も併記した。

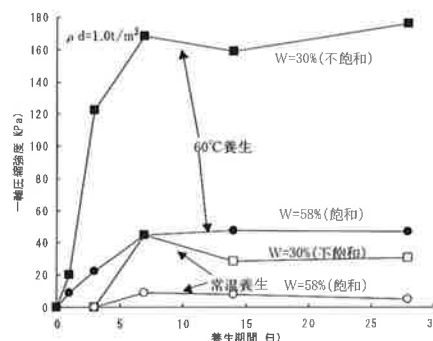


図-3 不飽和供試体の強度発現

図より、石炭灰の強度増加が1週間程度で収束すること、養生温度60℃の条件下では、常温養生下よりも強度発現が著しく、その比率が4倍程度であること等、図-2と同様の傾向を示すことがわかる。ただし、不飽和の場合、常温養生で40kPa、60℃養生で180kPaと飽和の場合よりも強度の増加が大きい。特に60℃養生の場合は液状化抵抗としては十分な強度に至っている。本結果は、原位置において飽和状態にある処分場の地下水位を低下させた後、引き続き地中を加熱することによって、改良効果が著しく向上することを示唆している。

含水比が強度に与える影響を調べた実験結果を図-4にまとめる。これは、含水比を0% (乾燥状態) ~58% (飽和状態) まで変化させた供試体 ($\rho d=1.0\text{t}/\text{m}^3$) を常温および60℃にて7日間養生した場合の一軸圧縮試験結果である。

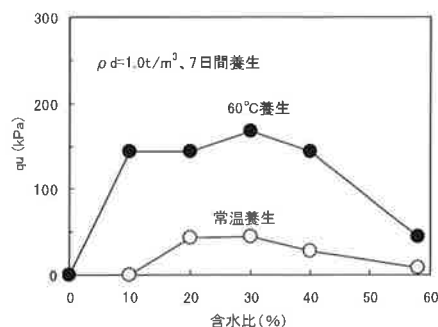


図-4 含水比と一軸圧縮強度 q_u の関係

図より乾燥側および完全飽和側では強度発現は小さく、その中間の含水比で強度はほぼ一定になる。また、常温養生と60℃養生を比較すると、いずれの含水比においても後者の強度が前者のものよりも大きくなること、60℃養生では、強度発現が確保される含水比の幅が若干広がることが指摘できる。

図-5は、乾燥密度を種々に変えた含水比30%の不飽和供試体の7日後の一軸圧縮強度と養生温度の関係を示したものである。不飽和供試体では、常温から60℃までは温度上昇とともに単調に強度が増加し、80℃付近で収束する傾向を示す。原位置にて60～80℃程度の温度上昇を与えておけば加熱効果は十分に発揮されるものと考えられる。乾燥密度を高めるほど、温度上昇に伴う強度の増加率（図中の右上がりの傾き）も大となる。例えば乾燥密度1.3t/m³といった高密度+高温の組み合わせ下では、qu=500kPaを超える強度値が得られており、液状化対策のみならず直接基礎の支持地盤の造成といった用途も可能となる。一方、飽和供試体の場合、養生温度を高めても、これによる強度増加は微々たるものである。

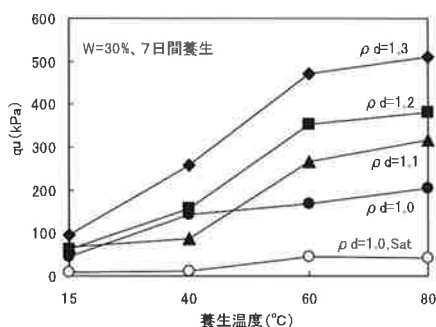


図-5 養生温度と一軸圧縮強度の関係

以上の結果は、高密度+不飽和+高温養生が組み合った条件下において顕著な強度増加が生ずることを示している。石炭灰は水中単位体積重量が通常の土砂に比較して小さい。したがって、原位置において石炭灰地盤の密度増加を図る一方策としては、地下水位低下によって地盤の不飽和化と同時に有効応力の増加を図ったり、プレロードによって圧密を促進させる方法が効果的と考える。これに地中加熱を併用すれば、石炭灰の強度発現における最適条件を原位置で再現する事ができる。

締固められた石炭灰の強度が、密度や含水比のみならず、灰種や化学組成によって大きく異なることが報告されている⁴⁾。そこで、CaO含有率の違いが強度発現に及ぼす影響を検討するために、常温養生および60℃養生後の一軸圧縮強度をCaO含有率に対して整理した。その結果を図-6に示す。常温養生、60℃養生供試体ともCaO含有率が大きいほど一軸圧縮強度が増加する傾向を示す。ここで示す強度0kPaとは水浸後崩壊したことを現す。図-6中には、液状化抵抗の目安となる一軸圧縮強度50kPaを波線で併記した。常温養生供試体では半数以上の灰種が50kPa以下であるのに対し、CaO含有率が3%以上を目安として、

加熱供試体のほとんどが50kPaをクリアしていることがわかる。一方、CaO含有率が3%未満の石炭灰に対し、乾燥密度や養生温度、養生期間をさらに変化させた場合の実験結果を図-7にまとめる。CaO含有率1%近くの低品質な灰（CaO=0.8%、1.2%）の乾燥密度を種々に変え、80℃で28日間養生した結果である。プレロード+地下水位低下により極力地盤密度を高め、より高い温度で長期養生してやれば、低品質の石炭灰であっても所定の強度を得ることが可能といえる。

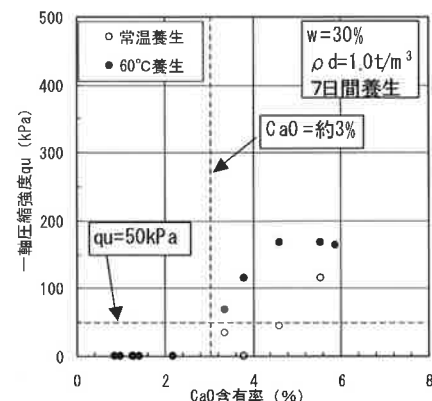


図-6 CaO含有率と一軸圧縮強度の関係

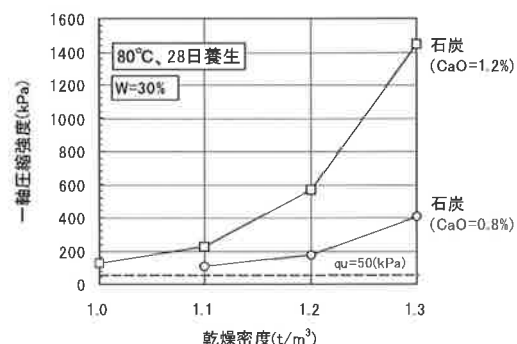


図-7 乾燥密度と一軸圧縮強度の関係

(3) 加熱履歴を受けた一般灰の強度特性

一般灰（廃木材、廃紙、廃プラスチック等が混在する一般産業廃棄物の焼却灰）に対する加熱効果を調べた結果を図-8に示す（乾燥密度に対する強度増加傾向としてプロット）。加熱前の供試体はモールドから脱型すると、直ちに崩壊し、自立しなかった（一軸圧縮強度quはほぼ0kPa）。これに対し、加熱温度60℃、養生日数28日では一軸圧縮強度はqu=50～130kPaと、前述の石炭灰を大きく上回る強度発現が得られた。図中には同一乾燥密度における石炭灰（CaO3%）の強度値を併記したが、今回用いた一般灰のCaO含有率は25%と石炭灰に比べてかなり高く、これが図に示すような強度発現の違いをもたらしたものと思われる。

CaOの含有率以外にも原位置では、一般焼却灰の処分場は陸上処分が主体であるために不飽和化のための地下水位低下の措置を講ずる必要がないこと、撒き出し時の重

機での転圧も行われているので、新たに密度増加を図る必要もないなどの利点を指摘することができる。石炭灰処分場よりもより効果的、効率的、経済的に地盤強度の増加を達成できる可能性がある。

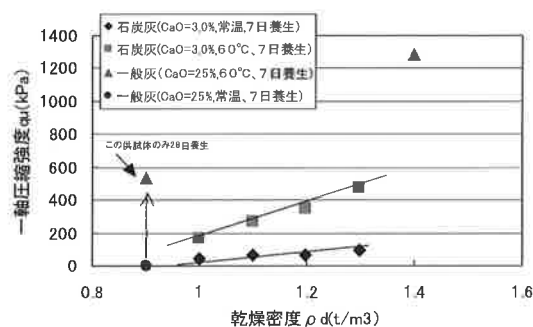


図-8 乾燥密度と一軸圧縮強度の関係

3.2 加熱による産業廃棄物焼却灰の有害物質不溶化効果

石炭灰は極微量ながら、ホウ素、六価クロム、ヒ素などの有害物質を含有しており、また一般焼却灰においても鉛の溶出の可能性が指摘されている¹⁾。これら有害物質の溶出を、加熱固化により生じた不溶性水和物により不溶化できるか否かの検討を行った。

試料としては、3.1で使用した石炭灰 (CaO含有率0.8%) および一般灰 (CaO含有率25%) を用いた。対象とした有害物質は、石炭灰についてはホウ素、ヒ素、六価クロムを、一般灰については鉛とし、熱固化前後での溶出量を調査した。使用した供試体の諸元および試験結果をそれぞれ表-3および表-4に示す。

表-3 供試体の諸元

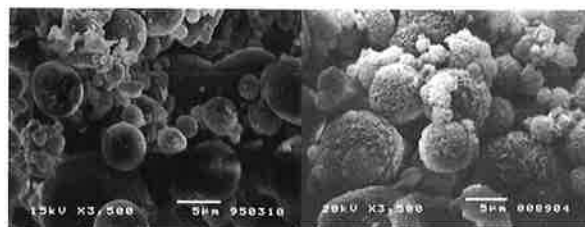
	乾燥密度 (t/m³)	含水比 (%)	養生温度 °C	養生期間 日	一軸圧縮強度 (kPa)
石炭灰	1.0	20	80	28	110
一般灰	0.9	60	60	28	500

表-4 有害物質の溶出量の変化

灰種	石炭灰			一般灰
有害物質名	ホウ素(mg/L)	ヒ素(mg/L)	六価クロム(mg/L)	鉛(mg/L)
加熱養生前	12.26	0.215	0.065	0.37
加熱養生後	2.8	0.019	0.011	0.006
環境基準	1.0	0.01	0.05	0.01

*溶出試験は環境庁告示46号に従った。

表-4より、加熱固化によりホウ素、ヒ素、六価クロム、鉛ともに、大幅な溶出量の減少が認められる。写真-1および写真-2には加熱前後の試料のSEM像を示すが、加熱後には不溶性水和物の生成が認められ、これが有害物質を封じ込めたものと推察される。有害物質の溶出については、加熱前の試料の中でも溶出傾向のばらつきが大きく、今後、加熱による溶出防止効果について、幾つかの異なる焼却灰で確認を行っていく必要があると考えられる。



(加熱前) (加熱6日後)
写真-1 石炭灰のSEM写真 (×3500倍)



(加熱前) (加熱6日後)
写真-2 一般灰のSEM写真 (×3500倍)

4. 大型土槽実験による加熱効果の検証

4.1 実験方法

実験で用いた模型土槽を図-9に示す。土槽は内径1m、高さ1mの円筒型の鋼製土槽であり、この中に高さ70cmまで飽和状態で試料を投入し、模擬地盤を作成した。模型地盤には40cm間隔で吸水用の実験用のウエルポイント、加熱用の棒状ヒーターを設置し、地表面から20cmおよび40cm下の土中に埋め込まれた熱伝対により地中温度を測定した。また、試料にはCaO=0.7%、1.9%、3.2%の3種類の石炭灰を用い、計3ケースの実験を行った。実験の手順を以下に示す。

- ① 非閉鎖型海面処分場を想定し、人工海水を満たした土槽内に気乾状態の石炭灰を水中落下により堆積させ、その後、10日間放置した。その時の乾燥密度 ρ_d は0.97t/m³、含水比は60%であり、実石炭灰処分場に近い緩詰め状態を再現できた。
- ② 実験用のウエルポイントに負圧を発生させ、完全飽和状態の試料に吸水を行って不飽和化を図る。吸水を断続的に1週間行い、この過程で含水比は47%まで低下した。
- ③ ウエルポイントを撤去し、同じ位置へカートリッジヒーター (以下、ヒーターと称す) を設置し、加熱を開始した。なお、加熱中には外気温の影響をできるだけ避けるため土槽の周囲を断熱材で覆い、上部をシートで密封した。
- ④ 加熱終了後、土槽に再び水を供給し、地盤が完全に水没した状態で7日間の放置を行い、飽和化した。
①～④の段階毎にコーン貫入試験を実施し、地盤強度を測定した。なお、カルシウム分の最も多いCaO=3.2%のケースでは、飽和後もコーン貫入が不能となったた

め、実験終了後にブロックサンプリングを行い、これを整形した供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した。

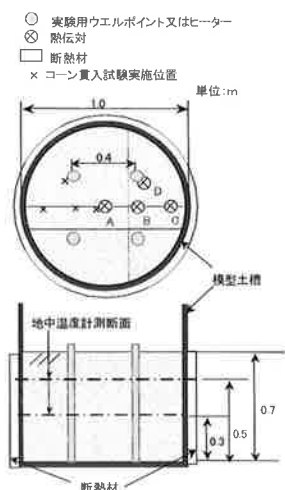


図-9 模型土槽の概要

4.2 実験結果

図-10は、模型地盤中央部(A点)、ヒーター間の中間点(B点)、土槽端部(C点)、ヒーター自体(D点)の4点の加熱中の温度変化を時系列で示したものである。

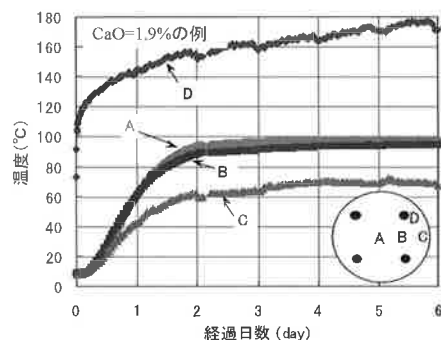


図-10 地盤内温度の経時変化

図よりC点では、外気温の影響を受け他の点に比べて温度上昇量が少なく、最終的には外気温に対して平衡した温度状態に収束したと考えられる。また、A点とB点においても加熱初期にはヒーターに近いB点が若干先に温度上昇するもののほぼ同じ立ち上がりを示し、最終的には周りの熱源で囲まれるA点の方が若干高い温度(98℃)に至っている。このことから、実施工でヒーターを配置するに当たって、ヒーターで改良対象地盤内の周りを囲む事が効果的であることがわかる。また、逆に、ヒーターで囲っている領域の外では地中温度が急激に減衰するため、加熱エリア外の周囲におよぼす影響は小さいと予測できる。地盤内の温度上昇は2日で一定となり、その後さらに9日間、土槽中心部(A点)が80℃以上に保持されるように通電を続けた。B点におけるコーン貫入試験結果を実験の各段階ごとにプロットした結果が図-11である。

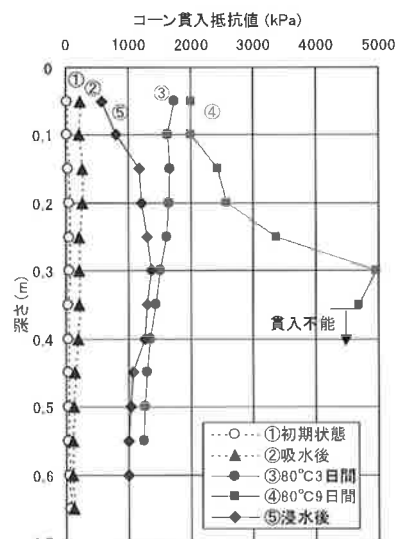


図-11 コーン抵抗貫入値の変化(B点)

図より初期状態(①)、吸水後(②)にはほとんど強度増加が無かったのに対し、80℃に達した後の3日後(③)には大きく強度発現している。この時点の含水比は43%であり、吸水後(②)の47%とさほど変わっておらず、不飽和化の影響よりも加熱による固化作用⁵⁾の影響が支配的になっているものと考えられる。更に80℃に達した後9日目(④)には最大5000kPaもの強度が発現している。加熱終了後に再び水浸させると(⑤)サクシジョンの解放により強度は低下し、③の状態に至った。しかし、同じ飽和状態の初期状態(①)と比較すると、10倍以上の大きな強度増加を示す結果となった。このことから、水浸飽和後も加熱による固化作用が保持されていることがわかる。図-12には加熱を終了し、完全に水浸させた後の強度を測定位置別に比較した結果を示す。

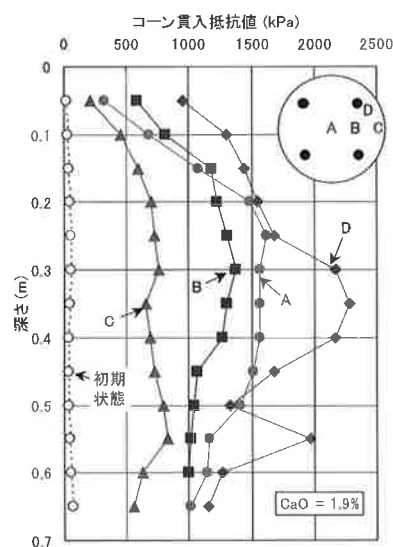


図-12 測定位置による強度の違い

図-12で示した温度履歴の差が強度にも現れ、高い地中温度であった地点ほど大きな強度を示し、完全飽和した

後もその傾向が残存している。また深度方向で見ると、土槽の中央部付近で強度が高まる傾向にあるが、これも、土槽の上下端面では外気温の影響を受けて温度上昇が阻害された結果と考えられる。図-13には、加熱飽和後におけるコーン貫入抵抗値の深度方向分布（A点）を各ケースで比較した結果を示す。図よりCaOの含有率の多い石灰灰地盤ほど貫入抵抗値が大となっており、前述した要素試験の結果と符合している。A点位置のG.L. -35cm地点からサンプリングした試料の一軸圧縮強度とCaO含有率の関係を示したものが図-14である。この図からもCaO含有率が多いほど強度発現が顕著となることが伺われる。

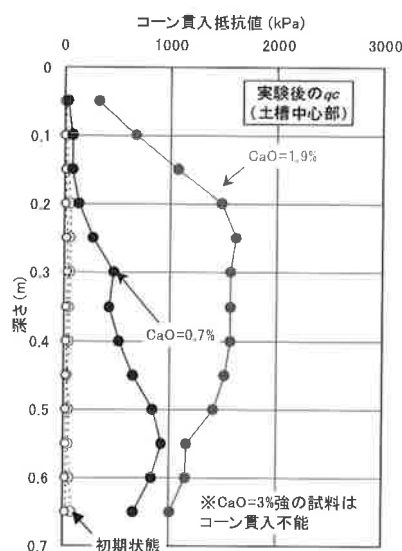


図-13 各ケース（CaO含有率の違い）による強度の違い

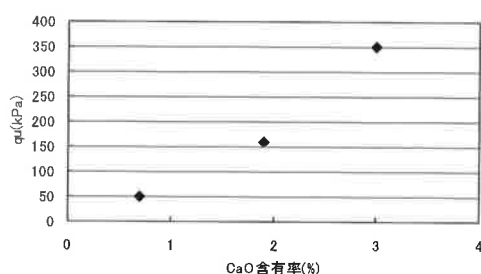


図-14 CaO含有率と一軸圧縮強度の関係（A点、G.L. -35cm付近）

5. 施工法の検討とコスト試算例

実処分場で地中加熱を行う場合の施工法とコストについて概略検討を行い、提案工法の実現性について考察を加えた。コスト試算に際しては、改良対象とする処分場がある領域に区切ったユニット毎の施工を想定した。これは、与えられた工期に応じて、1回に施工を行う範囲を限定し、初期設備費と使用電力量の低減を図るものである。ユニット単位での施工の概略および順序を図-15に示す。施工手順を以下に示す。

①ヒーター防護管圧入

ヒーター自身が直接圧入に耐えうる強度を有していない事、およびヒーターパイプの腐食の問題が懸念されるため、圧入に耐えうるH鋼にヒーターを挿入できるさや管を一体化させ、これを事前に圧入しておく。

②ヒーター挿入

③ヒーター加熱

所定の温度と期間でヒーターにより加熱する。

④ヒーター引き抜き

加熱終了後（改良後）にヒーターを撤去する。

⑤ ヒーター防護管引き抜き

そして、次のユニットに施工を進める。①～⑤の施工を繰り返し行い、処分場全体を徐々に改良してゆく。なお、海面非閉鎖性処分場の場合には、シートパイルによる仕切工やウェルポイントによる地下水位低下が必要となる場合がある。

施工コストの試算結果を以下に示す。施工コストは施工規模や工期によって大きく異なるため、以下に示す条件にて試算を行った。

- ・施工範囲；縦100m×横100mの10000m²の面積、深さ10mの範囲を改良する（図-15参照）。
- ・施工期間；約4年2ヶ月
- ・施工ユニット；1ユニットの広さを縦20m×横20mとし、各ユニット毎に順次施工を行う。
- ・加熱温度および時間；地盤の養生温度が80℃になるように加熱し外気温は10℃とした。また加熱時間は目標の地盤温度80℃に上昇させる昇温時間を30日、80℃に保つ保温期を30日とした。

本工法のコストの大部分を占める電力量の算定方法を以下に示す。

施工期間の総電力量 W_a は、地盤を所定の温度まで上げる期間（昇温期）の電力量 W_p と一定温度で養生する（保温期） W_s の合計となる（ $W_a = W_p + W_s$ ）。また、昇温期および保温期のいずれの場合も、施工ユニットの境界面から熱ロスを生じる。すなわち、昇温期の電力量 W_p は地盤の温度を上げるための電力量 W_u と熱ロスを補うための電力量 PL の合計となる（ $W_p = W_u + PL$ ）。一方、保温期の電力量 W_s は熱ロスを補う電力量 PL と等しくなる（ $W_s = PL$ ）。以上により、地盤温度を上昇させるための電力量 W_u は以下に示す式(1)で算定した⁸⁾。

$$W_u = (V \times \rho \times C \times \Delta T) / (860 \times T_u) \quad (1)$$

ただし、 V ：地盤の改良体積(m³)

ρ ：地盤の比重(kg/m³)

C ：地盤の比熱(Kcal/kg・℃)

ΔT ：上昇温度(℃)

860：熱量を電力量に変換するための係数

1kwh=860Kcal

T_u ：目標の温度まで上げるまでの時間(hr)

表面ロス量 PL の算定式を式(2)に示す。

$$PL = S \times L \times T_k \quad (2)$$

ただし、 S ：表面ロスを生じる面積(m²)

L: 単位面積当たりの熱ロス量 (kwh/m²)

Tk: 保温時間 (hr)

なお、Lは前述した大型土槽実験における熱ロス計測データを基に同定した。また、今回の試算では熱ロスの最大となる場合と最小となる場合の2タイプについて行った(図-16参照)。ただし、地盤は有限な広さをもった連続体であり、側面方向の熱ロスはほとんど無いと考えられるため、実際には熱ロス小のモデルに近いと思われる。表-5に施工コスト試算結果を示す(前述の電気量その他、ヒーターおよび防護管の材料費、打設、引き抜きに要する費用を計上している)。表には熱ロスが大きい場合と小さい場合の2ケースについて示し、同条件での深層混合処理工法の試算結果も併記した。本結果から、本工法は既存の深層混合処理工法³⁾と比較すると6割～8割減の施工コストとなり極めて安価であることがわかる。

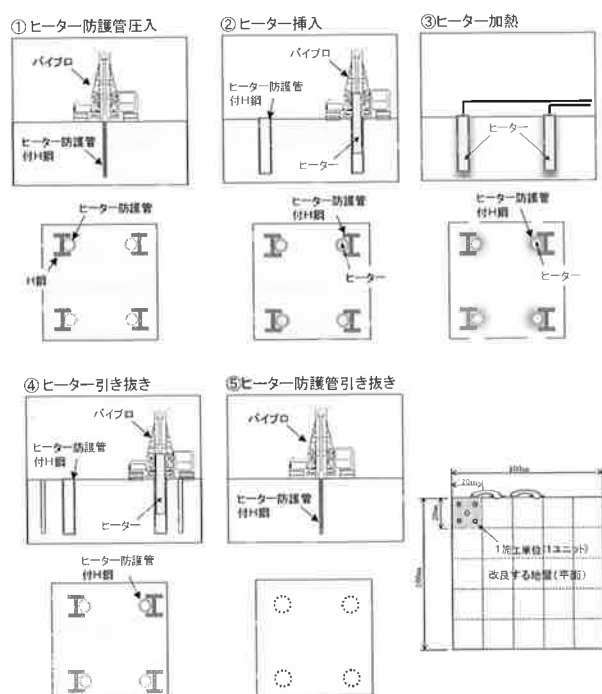


図-15 施工概要図

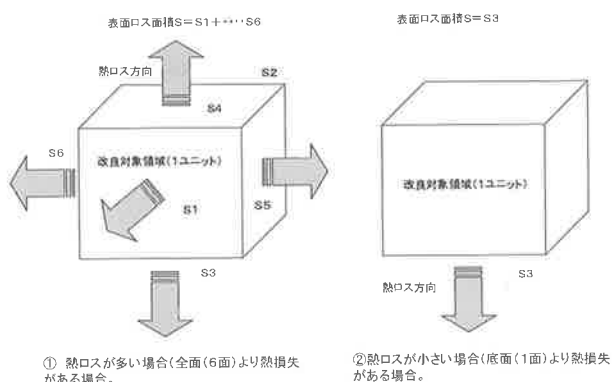


図-16 熱ロスモデル(最大と最小となる場合)

表-5 施工コスト試算結果

		施工単価
本工法(地中加熱固化)	熱ロス大	3,100円/m ³
	熱ロス小	1,900円/m ³
深層混合処理工法		5,000～12,000円/m ³

6. おわりに

軟弱かつ有害物質溶出の可能性を有する既存産業廃棄物処分場に対し、地中加熱により地盤の強度増加と有害物質の不溶化処理を行う手法を提案し、その有効性について基礎的な検討を加えた。その結果、室内要素試験と土槽実験により提案工法の有効性、経済性を確認することができた。特に近年問題となっている産業廃棄物一般焼却灰に対しては、カルシウム分の含有量や現地処分場の含水状態等を勘案すると、提案工法の適用性が高いものと思われる。本工法は処分場跡地の早期有効利用へ役立つことに加えて、夜間の余剰電力を利用することを前提としているため、エネルギーの有効活用の面からも社会に貢献する事が出来ると思われる。また、施工期間の主要工程に相当する通電加熱時には無人かつ、無振動・無騒音での施工が可能であり、環境面でも優れた手法であると言える。

本工法は、現時点では基礎的な検討段階にあり、実処分場での加熱効果の確認や設計方法の検討、コストの詳細な検討、高温状態に対する施工中の安全管理の検討など、多くの課題を解決し、本工法を現実化していく必要があるものと考ええる。

参考文献

- 1) 地盤工学会：廃棄物の地盤材料としての利用に関する研究委員会報告書、平成12年3月
- 2) 片岡他：締固めた石炭灰の強度特性、第26回土質工学会、pp. 1883～1884、1996
- 3) 福田他：石炭灰の温度変化に伴う力学的性質、第24回土質工学会、pp. 1071～1072、1994
- 4) 佐野・山田・太田・山本：養生条件の違いが締固めた石炭灰供試体の一軸圧縮強さおよび体積変化に及ぼす影響、土木学会論文集、No. 463, III-22, pp. 45～53、1993.
- 5) 後藤浩一：廃棄物としての石炭灰による埋立地盤の液状化に関する研究、平成6年、京都大学博士論文、1994
- 6) 土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで、pp. 263～265.
- 7) 今井他：締固めた石炭灰の強度発現形態、第20回土質工学会、pp. 1607～1610、1990
- 8) 坂口電熱(株)：シーズヒータ技術資料
- 9) 土木学会：最新の地盤改良工法の現状と設計・施工のポイント、p235、平成11年11月