

・研究課題名・研究番号＝廃棄物最終処分場跡地の形質変更のための施工方法と環境リスクの相関に関する研究（K1837）

・国庫補助金精算所要額（円）＝14,953,000

・研究期間（西暦）＝2005-2007

・代表研究者名＝嘉門雅史（京都大学）

・共同研究者名＝勝見 武（京都大学），稲積真哉（京都大学），乾 徹（京都大学）

・研究目的＝廃棄物最終処分場の跡地利用に際して発生しうる，土地の掘削・構造物の建設に伴う処分場遮水工の損傷，処分場内部の生化学的雰囲気の変化に伴う重金属等の溶出や浸出水質の悪化，メタンガス・臭気等の発生，といった環境リスクとその機構に関する学術的知見を蓄積し，これらの環境リスクを適正に制御しうる工法や技術的手法を確立することを本研究の目的とする。具体的には，① 跡地利用形態と廃棄物の種別を考慮した形質変更に伴って生じる環境リスクの推定，およびその結果に基づいた適正な施工方法と環境リスクの制御工法についての資料調査を実施する。さらには，個別の技術的課題として，② 跡地利用に伴う掘削，構造物の設置に対応可能な構造安定性に優れた遮水工構造の検討，③ 遮水層として機能している堆積粘土地盤に支持杭を打設した際の遮水性能への影響の評価，④ 跡地利用に際して掘削・切土等が行われる場合の酸素・水分供給量の変化が処分場内部の微生物活動や化学的雰囲気に与える影響，および安定化した汚染物質の形態・挙動に与える影響の解明，の3点を取り上げ，実験的検討を行った。①については，埋立廃棄物の種類，埋立地の分類，形質変更や跡地利用の形態などに応じた浸出水質の変化，ガスや臭気の発生，地盤の不同沈下などをはじめとするリスクを資料調査によって整理し，その結果に基づいて，跡地利用における施工上の制限事項を明確にするとともに，予想しうるリスクに対する低減対策，調査・モニタリングプログラムを体系的に示す。②については，跡地利用に伴う構造物の建設，上載荷重の増加などは遮水工の損傷や遮水機能の低下をもたらす可能性が指摘される。この予防的措置として遮水工構造の構造安定性の照査が必須となる。処分場の遮水工は，遮水シート，不織布，粘土ライナーなどの多くの材料によって構成される多層構造であるが，材料自体のせん断強度と比較して，材料間の摩擦抵抗は小さいことから，ライナー構成材料間の境界面は遮水工の構造上弱点となる。そこで本研究では，廃棄物処分場遮水工に使用されるジオシンセティクス材料（遮水シート，不織布，ジオシンセティッククレイライナー），原地盤，粘土ライナーの境界面のせん断強度特性のデータの蓄積を目的とした実験的研究を実施した。建設直後の粘土ライナーが施工時の最適含水比，ジオシンセティクス材料が乾燥状態の条件下でのせん断特性を評価することに加え，水浸・湿潤条件下に変化した場合のせん断特性の評価を試みた。これは，遮水工が長期間に渡って供用されると，処分場内に滞留する浸出水との接触，ならびに原

地盤と比較して粘土ライナーは保水力が高いことから原地盤の水分や地下水を吸水することにより、湿潤状態や水浸状態になることを反映している。③ については、海面処分場の埋立跡地に構造物を建設する場合、支持力を確保するために鋼管杭の打設が想定される。一般に廃棄物埋立地盤は支持力が期待できない場合が多く、底部遮水層として機能している海底粘土層も軟弱で支持層としての機能が期待できないため、粘土層下部の支持層に支持力を担保させる必要がある。この際、鋼管杭が粘土層を貫通するため、杭と粘土界面に空隙が生じることによる漏水が懸念されている。一般的に軟弱粘土地層に杭を打設した場合には地盤沈下に伴うネガティブフリクションの発生が問題となるが、このフリクションの発生は杭と粘土が密着していることを示唆している。このことから、たとえ施工時に鋼管杭と粘土界面に空隙が生じたとしても空隙は閉塞し、漏水は抑制されと考えられるが、このことを実証し、漏水を定量的に評価することが求められている。本研究では、鋼管杭と粘土層の境界面からの漏水量を評価することを目的とした室内実験を実施し、鋼管杭打設が廃棄物処分場の底部粘土層の遮水性能に及ぼす影響について検討した。特に、(1) 打設前の粘土の圧密度の違いが漏水・周面摩擦に与える影響、(2) 粘土の物性の違いが漏水に与える影響、(3) 杭に働く周面摩擦と漏水との関係、に着目した検討を実施している。④ については、閉鎖された廃棄物処分場の廃棄物層内の汚染物質の移動性は低い状態に保たれているが、覆土や廃棄物層の掘削によって環境条件が変化すると、汚染物質の形態が変化し、浸出水中の汚染物質濃度が再度上昇する可能性が指摘される。本研究では、跡地利用の需要が高い焼却灰埋立海面処分場に着眼して、実際に埋め立てられる焼却灰、海成粘土を用いたカラム透水試験、ならびに大型カラム透水試験を実施した。カラム内における重金属、有機物等の環境汚染物質の安定化機構を検証することによって、跡地利用に伴う掘削等による酸素や水分供給量の変化が廃棄物層内の微生物活動や化学的雰囲気を与える影響、および汚染物質の動態に与える影響を明らかにすることを目的としている。

・研究方法=研究計画の項で述べた①～④の4つのサブテーマについて以下の方法で行った。①については、最終処分場跡地の形質変更によって生じる環境影響や地盤の沈下といったリスクとその軽減のための施工事例に関する資料調査を実施し、跡地利用形態(表層、中層、低層利用)、処分場の分類(安定型、管理型)、施工方法(盛土、覆土掘削、廃棄物掘削、基礎の設置など)毎に想定されるリスクとその管理基準の体系化を行った。さらに地盤改良工法などを適用したこれらのリスクを低減、制御するための工法、事例のとりまとめを実施した。

②については、長期渡って構造的に安定な処分場遮水工の断面構造ならびに設計手法の提案を行うための基礎的なデータを収集することを目的として、図-1に示すような廃棄物処分場の遮水工(底部遮水工、覆土層)を構成する、締固め粘土ライナー、不織布、遮水シート、ジオシンセティッククレイライナー、保護土層といった各層の境界面のせん断抵抗特性を、大型一面せん断試験装置(図-2)を用いて評価した。特に、前述したように湿潤、水浸状態におけるせん断特性を評価し、施工直後と比較した強度への影響を調査した。次に、実験的に得られた各境界面の粘着力、内部摩擦角に基づいて、廃棄物処分場の構造安定解析を実施した。解析においては、図-3に示すような一般的な内陸埋立処分場を想定し、締固め粘土層、遮水シート、不織布からなる底部遮水工、遮水シート、不織布、保護

土層からなる覆土工について、材料の境界面ですべり破壊が発生する場合の構造安定性を平時、地震時において評価した。解析では、様々な廃棄物処分場の形状（埋立深さ、埋立面積、法面勾配）を想定して、要求されるせん断抵抗力を算出し、技術者が簡便に設計に反映しうるチャートを示している。処分場の損壊が生じる主要の要因としては、単純なせ

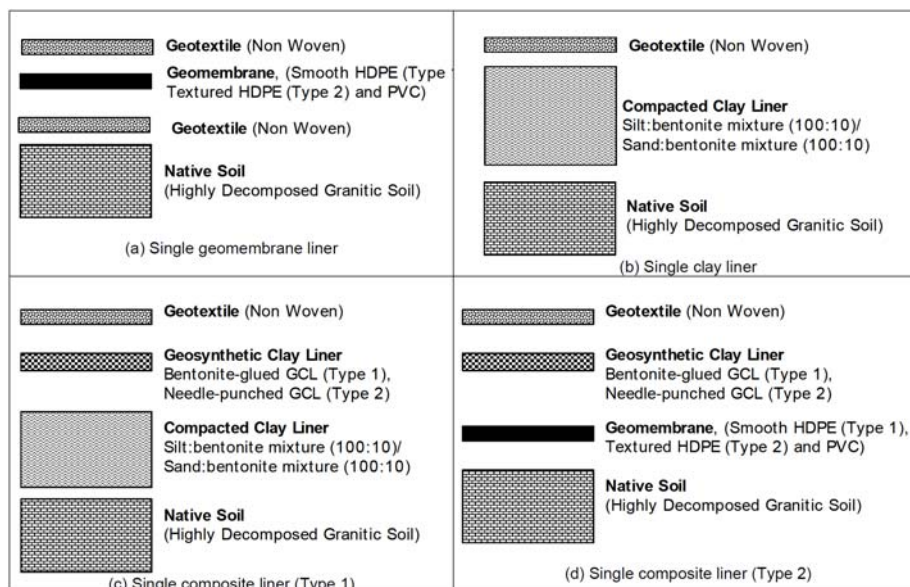


図-1 検討の対象とした処分場遮水工の構造

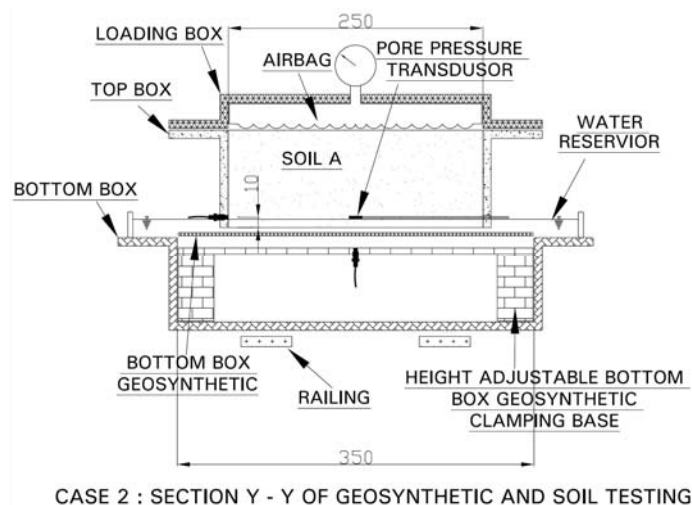


図-2 大型せん断試験装置（十材料—ジオシンセティック材の試験ケース）

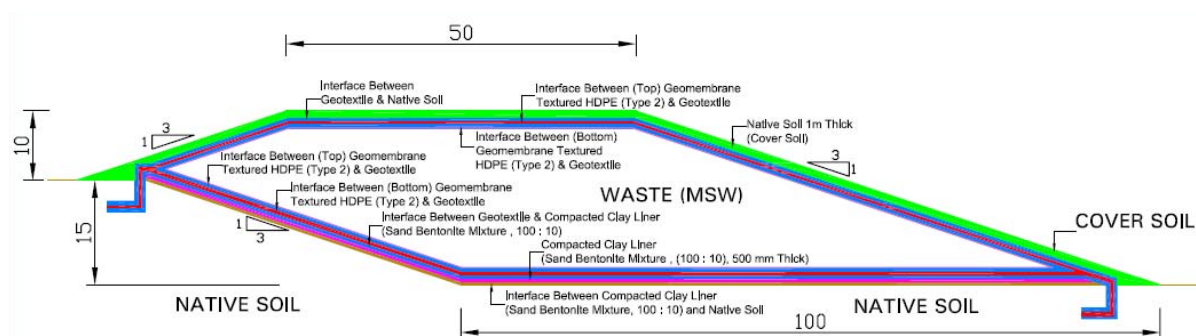


図-3 構造安定解析で想定した廃棄物処分場断面の一例

ん断抵抗力の問題に加えて、埋立処分されている廃棄物材料との **Strain incompatibility**（材料間の応力－ひずみ関係の相違）が挙げられる。例えば、基盤層に破壊が生じるような場合にも、廃棄物層はピーク強度のごく一部の強度しか發揮していない。既往の研究においても、基盤層とジオシンセティック材料の間にも **Strain incompatibility** が発生することが報告されている（Hisham et al. 2000）。このことから、**Strain incompatibility** が生じる場合の構造安定性を評価する場合には、ピーク強度を用いるのではなく、ひずみ－せん断抵抗力の関係を考慮する必要がある、このことを考慮した安定性の評価を行った。

③については、透水係数やコンシステンシー特性などの物理特性が異なる 4 種類の粘土試料を用いて図-4 に示す試験装置を用いた透水試験を実施した。試験装置の円形金属セル（80 mm 径）よりも 1～2 mm 程度小さめに成形した予備圧密済みの粘土試料をセル内にセットし、杭打設直後に鋼管杭と粘土層の境界面に空隙ができた状況を想定した。標準圧密試験機にセットした後に供試体を圧密するとともに、圧密中の円柱供試体上下面の土圧計測結果から供試体側面に働く周面摩擦力を算定し、供試体と金属壁面の密着性を評価した。その後、供試体上下面に水頭差を与え上向流で供試体の透水性を評価した。この透水試験装置は、透水試験時に排出側となる上部ペデスタルの中心から直径 60 mm より内側部分の透水量と外側部分の透水量が別々に計測できるようになっている。このことにより、同一の供試体による一つの透水試験で粘土自体の透水係数と粘土－金属境界面の漏水を含んだみかけの透水係数を求めることができる。試験では、粘土試料の圧密度、粘土の種類が粘土－金属境界の界面透水量係数に及ぼす影響、周面摩擦力と界面における漏水量の相関について検討を行った。

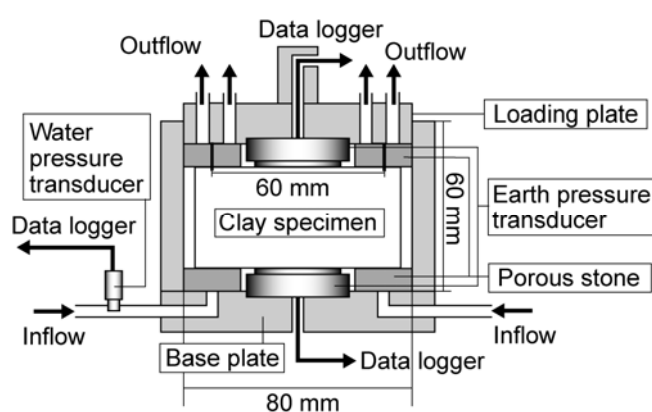


図-4 改良型透水試験装置

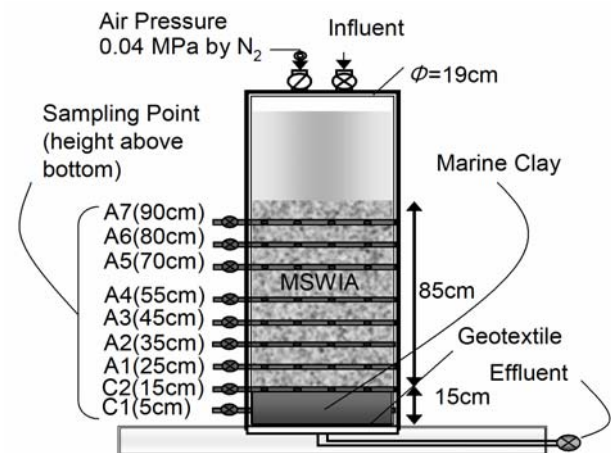


図-5 大型カラム透水試験装置図

④については、力学的にも安定性が高く、埋立面積が広大であり、立地的にも跡地利用に適すると考えられる焼却灰埋立海面処分場を対象として、廃棄物層内における重金属の動態、安定化機構について実験的評価を実施した。具体的には、一般廃棄物焼却灰を埋め立てた海面処分場の焼却灰層、および底部粘土層周辺における生化学的条件と重金属（亜鉛）の存在形態、移動性を、柔壁型透水試験、大型カラム透水試験を実施することにより計測、分析を行った。柔壁型透水試験は、焼却灰埋立層と海成粘土層に連続的に溶媒（海水）を通水させた際の、焼却灰層－粘土層境界における生化学的条件の変化、重金属の溶出濃度の変化を測定することを目的として実施した。特に、溶媒中の栄養塩となりうる化

学物質濃度を変化させ、溶媒の化学特性が生化学的条件に及ぼす影響について検討を行った。大型カラム透水試験においては、より現場に近い条件を模擬し、図-5に示すような190 mm径の密閉カラム内に150 mm高さの粘土層、および850 mm高さの一般廃棄物焼却灰層を設置し、海水で飽和させた。カラム内部は嫌気状態に保ちながら、焼却灰層上部に一定水位を与えて連続的に通水させることにより、焼却灰の長期的な洗い出し効果を模擬した。カラムの異なる高さに設置した9箇所のサンプリングポートにおける、有機物濃度、微生物活性、pH、酸化還元電位、重金属の溶出濃度のモニタリング結果に基づいて、廃棄物層内における重金属の移動性と生化学的条件との相関を推定した。

・結果と考察＝サブテーマ①に関する結果の概要を以下に示す。廃棄物埋立跡地の利用形態を分類する尺度として、利用する地盤を層別に分類した場合、表層利用・中層利用・底層利用の3つに区分することができ、盛土、覆土掘削、廃棄物掘削、基礎の設置などそれぞれの区分に応じた形質変更が実施される。廃棄物埋立処分場には多種多様な廃棄物が不均一、不規則に埋め立てられており、埋立物の物理的特性（土としての基本的な性質）、地盤工学的特性（支持力や沈下量等）、化学的特性（ガス、浸出水等）は埋立地ごとに異なる。一般の土砂埋立てによる造成地とは異なり、有機物が含まれているのでガス、汚水、臭気

表-1 形質変更によって生じることが予想されるリスク項目

形質変更の形態		影響	生じるリスク
盛土	廃棄物層の高密度化		・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
	保有水等浸透水集排水設備、ガス抜き管、遮水工、擁壁の損傷		・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生 ・廃棄物の流出による土壌汚染 ・保有水の流出による地下水汚染
	雨水の浸透状況の変化		・保有水の増加、水質の悪化 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
覆土掘削	掘削覆土の仮置き、搬出		・粉塵の飛散、水質汚染、土壌汚染
	覆土厚の減少		・可燃性ガス量の増大、臭気の発生
	流出防止設備、ガス抜き管の損傷		・水質汚濁 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
	雨水の浸透状況の変化		・保有水の増加、水質の悪化 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
廃棄物掘削	掘削廃棄物の仮置き、搬出		・粉塵の飛散、水質汚染、土壌汚染
	覆土の除去		・可燃性ガス量の増大、臭気の発生 ・保有水量の増加
	流出防止設備、ガス抜き管の損傷		・水質汚濁 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
	雨水の浸透状況の変化		・保有水の増加、水質の悪化 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
	遮水工、地下集排水設備の損傷		・保有水等の流出 ・保有水位上昇に伴う埋立層の嫌気化、保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
基礎の設置	布基礎・べた基礎	廃棄物層の高密度化	・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
		保有水等浸透水集排水設備、ガス抜き管、遮水工、擁壁の損傷	・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生 ・廃棄物の流出による土壌汚染 ・保有水の流出による地下水汚染
		通気性の低下	・臭気の発生、可燃性ガスの滞留・放散
	杭基礎	基礎地盤の沈下	・遮水工の損傷 ・保有水位の上昇
		保有水・浸透水集排水設備、地下水集排水設備、ガス抜き管、遮水工の損傷	・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生 ・保有水の流出による地下水汚染
設備の変更	擁壁等流出防止設備の改変		・廃棄物の流出防止や汚濁水の溢水防止機能への影響 ・水質汚濁、土壌汚染
	遮水工の改変		・保有水の流失に伴う水質汚濁、土壌汚染 ・廃棄物の流出
	集排水設備（地下水、保有水、浸透水）、ガス抜き設備の改変		・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
跡地利用段階	荷重の増加		・盛土と同様の影響
	雨水浸透状態の変化		・保有水の増加、水質の悪化 ・埋立層の嫌気化による保有水質・ガス質の悪化、臭気の発生
	通気性の低下		・臭気の発生、可燃性ガスの滞留・放散
	構造物の設置		・金属、コンクリートの腐食、劣化 ・廃棄物地盤の不同沈下

の発生は長期にわたり，また一般的に地盤の強度が小さいという特徴をもっている。有機物が長期にわたって分解するので埋立地盤は長期にわたって沈下し，かつ不均一な埋立が行われている場合が多いので不同沈下を生じやすい。さらには，廃止後の廃棄物埋立地盤での新規の掘削によって，ガスの発生割合や組成の時間的变化，浸出水の内容変化などが生じるリスクを避けることが出来ない。これらのことを考慮すると，廃棄物埋立地盤の形質変更を行う際のリスクとして，1) 地盤沈下および不同沈下，2) 地盤の支持力不足，3) メタン等のガスや悪臭の発生，4) 浸出汚水の発生とそれに伴う地下水等の汚染，5) 基礎構造として用いられる金属・コンクリートの腐食や劣化，6) 植生・樹木の生育への影響，7) 埋立廃棄物の物性と施工への影響（基礎設置，掘削への支障），8) 掘削廃棄物の処理，が挙げられる。これらのリスクを形質変更毎に分類すると表-1 のようにまとめられる。これらのリスク項目を適切に管理するためには，モニタリング等において各リスク項目のリスクの程度を評価しうる判断基準を明示する必要がある。そこで，管理型処分場の跡地利用を例として，想定されるリスクの管理・判断基準を，既存の各種基準項目を調査することにより整理した（表-2）。これらのリスクを回避，低減させるためには，支持力や沈下特性の改善，安定化の促進，有害物質の除去等を目的とした建設・施工技術の適用が期待される。しかしながら，廃棄物地盤は前述した通り，一般の地盤とは異なる特性を有することからこれらの技術の適用性についても未解明な部分が多い。そこで，過去の事例に基づいて廃棄物地盤に対する代表的な建設・施工技術の適用事例とその効果についても，資料調査を併せてとりまとめた。

表-2 管理型処分場の跡地利用におけるリスクとその判定基準

リスクの種類	リスクの対象時期	表層利用	中層利用	底層利用
浸出水・腐食	変更時 利用時	排水基準		
	利用時	—	地下水環境基準	
			pH CO ₂ NH ₄ ⁺ Mg ²⁺ SO ₄ ²⁻ (DIN4030)	6.5 以上 15 mg/L 以上 15 mg/L 以下 100 mg/L 以下 200 mg/L 以下
発生ガス	変更時	CH ₄ O ₂ CO ₂ H ₂ S	1.5%以下 18%以上 1.5%以下 10 ppm 以下	(最終処分場跡地形質変更に係る施工ガイドライン)
		悪臭防止法		
	利用時	変更時と同等＋植生に異常を生じない程度		
廃棄物飛散	変更時	風速 5.5 m/sec(ビューフォート風力階級) (最終処分場跡地形質変更に係る施行ガイドライン)		
地盤沈下	利用時	極端な不同沈下を生じない程度(相対沈下量 ≤ 4.0 cm, 最大沈下量 ≤ 20 cm)	最大沈下 ≤ 10 cm 相対沈下 ≤ 2 cm	中層利用と同程度, 或いはほとんど沈下が完了していること
		残留沈下量 ≤ 10 cm (道路土工 軟弱地盤対策工指針((社)日本道路協会))	(建築基礎構造設計基準・同解説(日本建築学会))	
支持力	利用時	N 値 4～8 許容支持力 25～50 kN/m ² (埋立地安定化調査最終報告書 1994(日本廃棄物コンサルタント協会技術委員会))	N 値 8～15 許容支持力 50～100 kN/m ² 同左	N 値 15～30 許容支持力 100～200 kN/m ² 同左
		強熱減量 15%		
		対液状化:粒度分布等(港湾の施設の技術上の基準・同解説)		
劣腐化食	利用時	—	酸度 SO ₄ ²⁻ (DIN4030)	≥ 20 以上 ≤ 2000 mg/kg-dry soil
			土の比抵抗 (米国標準局)	≥ 6000

サブテーマ②に関する結果の概要を以下に示す。大型一面せん断試験を実施し、遮水シート、粘土ライナー（ベントナイト混合土）、不織布、ジオシンセティッククレイライナーといった材料の境界面におけるせん断抵抗特性を施工直後の条件と長期間経過後に想定される水浸・湿潤条件で計測を行った。せん断抵抗特性の評価にあたっては、最大せん断抵抗に加えて、前述した **Strain incompatibility** に影響を評価するために、ひずみ（相対変位）とせん断抵抗力の関係についても考慮している。試験結果の一例として施工直後の条件での各材料間のせん断抵抗特性をとりまとめたものを表-3 に示す。特に、HDPE シートとジオテキスタイル材（不織布）の境界ではせん断抵抗が非常に小さく、適用にあたっては留意が必要である。一方、水浸・湿潤条件下におけるせん断抵抗特性を施工直後の条件下と比較すると、(1) 不織布と遮水シート間のせん断抵抗特性には大きな影響がみられない、(2) 不織布は水浸条件下でほとんどの材料との間でより大きなせん断抵抗力を発揮する、(3)

表-3 施工直後条件下でのせん断抵抗特性の試験結果まとめ

Interfacing material	Geotextile		Smooth HDPE (Type 1) GM		Textured HDPE (Type 2) GM		Rear side of PVC GM		Front side of PVC BM		Bentonite side of BG GCL (Type 1)		HDPE side of BG GCL (Type 1)		Non woven side of NP GCL (Type 2)		Woven side of NP GCL (Type 2)		Native soil	
	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ	c	ϕ
Smooth HDPE (Type 1) GM	0.0	7.6																		
Textured HDPE (Type 2) GM	3.0	21.0																		
Rear side of PVC GM	11.3	18.6																		
Front side of PVC GM	26.3	16.9																		
Bentonite side of BG GCL (Type 1)	11.5	17.2	0.0	9.0	28.9	18.7	19.0	17.7	0.0	24.5										
HDPE side of BG GCL (Type 1)	0.0	21.8	2.2	8.9	0.0	19.8	11.8	20.0	0.0	25.1										
Non woven side of NP GCL (Type 2)	1.3	15.0	2.3	7.7	10.4	25.4	17.0	15.2	11.0	17.0										
Woven side of NP GCL (Type 2)	10.6	14.7	2.4	9.2	2.5	22.9	14.4	18.0	22.8	18.4										
Silt:bentonite mixture (100 : 10)	0.0	15.2	0.0	15.3	0.0	24.1	0.0	22.2	0.0	19.8	13.9	16.9	0.0	22.5	6.1	20.8	1.7	21.2	10.3	28.3
Sand:bentonite mixture (100 : 10)	0.0	15.6	0.0	13.7	0.0	24.5	0.0	19.7	0.0	16.9	6.7	17.4	15.3	13.5	0.0	22.6	0.0	22.4	0.0	31.0
Native soil	0.0	17.8	0.0	15.6	0.0	23.0	0.0	18.7	0.0	20.2										

c: cohesion in kN/m^2 , ϕ : frictional angle in degree.

GM: Geomembrane, GCL: Geosynthetic clay liner, BG: bentonite-glued, NP: needle- punched

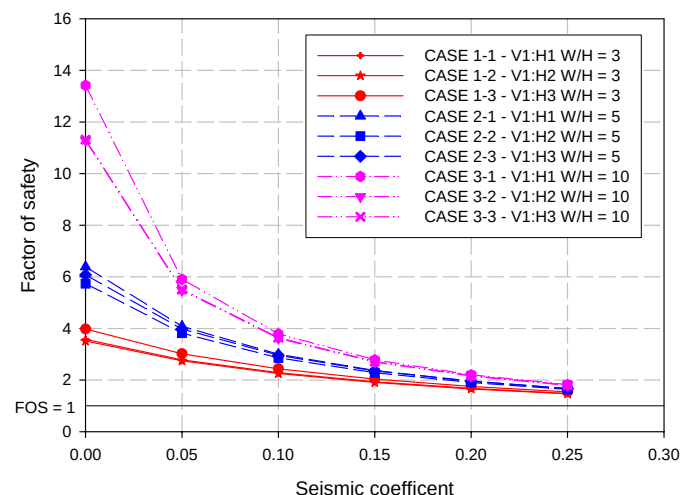


図-6 構造安定解析結果の一例

ベントナイト混合土と遮水シートとのせん断抵抗は水浸条件下で低下する，(4) 粗面処理を施した HDPE 遮水シートの摩擦抵抗力は大幅に低下し，湿潤条件下では通常の HDPE シートとほぼ同等である，(5) ベントナイト混合土と原地盤の間のせん断抵抗は 50～60%低下する，(6) 相対変位（ひずみ）とせん断抵抗の関係については水浸・湿潤条件下ではひずみ硬化性を呈する傾向がみられる，といった知見が得られた。次に，大型せん断試験で得られたせん断抵抗パラメータを用いて，図-1 に示した遮水工を有する廃棄物処分場の構造安定性を評価した。具体的には，廃棄物処分場の形状（廃棄物埋立深さ，斜面勾配），遮水工の種類，想定される地震外力をパラメトリックに変化させ，各条件下での構造安定性や要求されるせん断抵抗力を示すことにより，設計者が容易に構造安定性を評価できるチャートを作成した。図-6 にチャートの一例を示す。

サブテーマ③に関する結果の概要を以下に示す。鋼管杭表面を模擬した金属セル壁面と粘土材料の境界面の閉塞状況とその界面透水量係数を実験的に評価した結果，図-7 に示すように上載圧の増加とともに界面は閉塞し，上載圧が粘土の初期圧密圧力を超えた正規圧密状態になると完全に閉塞することがわかった。図-8 に実験に用いた粘土試料の透水係数と空隙閉塞後の界面透水量係数との関係を示す。粘土の透水性と金属面との界面透水量係数には強い比例関係が確認され，粘土の透水係数に基づいて鋼管杭を打設した際の漏水量をおおよそ推測できることが示された。但し，求められた界面透水量から導出できる杭打設後の粘土地盤からの透水量は，構造基準で定義された粘土層からの透水量よりも小さく，十分な遮水性が確保されることが確認できた。周面摩擦力に着目すると，界面の透水性が低くなると同時に摩擦力も線形的に増加することが確認できた。また，空隙閉塞後において杭打設前の粘土の圧密度が界面の透水性・周面摩擦に対して及ぼす影響はほとんどなく，杭の打設は埋立完了直後であっても長時間経過した後であっても変化しないと判断される。

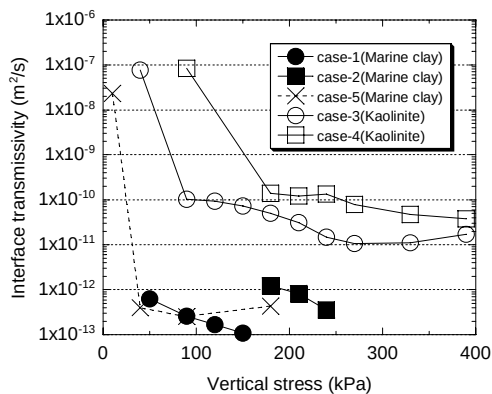


図-7 圧密圧力と界面透水量係数の関係

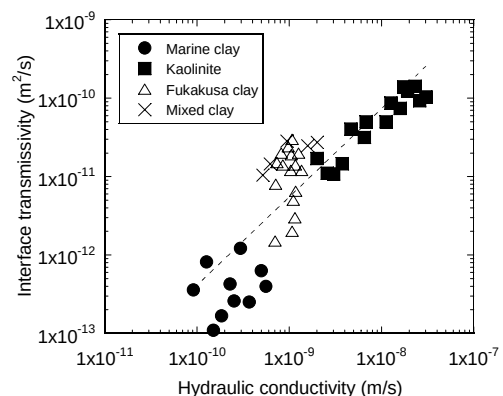


図-8 粘土の透水係数と界面透水量係数の関係

サブテーマ④に関する結果の概要を以下に示す。小規模の柔壁型透水試験によって評価した場合には，実験開始直後より，粘土層における微生物活動によって Eh の低下が生じ，還元性雰囲気へ数日程度で移行することが確認された。一方，pH については，粘土層によるアルカリ緩衝作用によって透水開始直後の pH は低いものの，その後は pH が急激に上昇し，最後に測定した時点では pH = 11.5 程度を示した。重金属（亜鉛）の顕著な溶出は確認されなかったが，そのメカニズムは時間の経過によって異なると考えられる。透水開始直後の pH が低く，Eh が高い段階では，粘土層による吸着機能が寄与していると考えられるが，時間の経過とともに水酸化物塩や炭酸塩といった難溶性の形態を示すためであると推

測される。大型カラム試験については、図-9 に示すカラム内の pH の深度方向分布とその経時変化に着目すると、焼却灰の強いアルカリ性のために実験開始直後の pH は 12.0 以上と高い pH を示す一方、粘土層の有する緩衝能力の影響で粘土層の pH は 9~11 程度を示した。時間の経過とともに焼却灰の洗い出しが進行するとカラム上部から pH の低下がみられ、316 日経過後の 100 mm 深さでの pH は 7 以下、450 mm 深さでは pH = 9.5 程度となっており、大きな時間変化は確認されていない。図-10 に Eh の深度分布とその経時変化を示す。焼却灰層を脱気して実験を開始したこともあり、実験開始直後から約 100 日経過後までは底部を除いたカラム全体で強い還元性を示した。Eh の時間変化に着目すると、試験開始直後に Eh が焼却灰層内部で -600 mV 以下と急激に低下したが、その後は Eh の上昇がみられた。316 日経過時点での焼却灰層内部の Eh は -200~-300 mV 程度を維持しており、大きな時間変化は確認されていない。試験開始直後の Eh の低下は焼却灰からの化学物質が高い濃度で溶出し、高アルカリ性を呈することに依存すると考えられるが、メカニズムについては検討が必要である。図-11 にカラムにおける各深度の pH, Eh, Zn 濃度の値を、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-S-Zn}$ システムにおける Zn の存在形態図(Hem 1972)にプロットしたものを示す。カラム内には他の物質も含まれるため、この図が本研究における Zn の存在形態を正確に表しているとはいえないが、カラム内の現象を考察する際の参考にはできる。深度 50 mm の

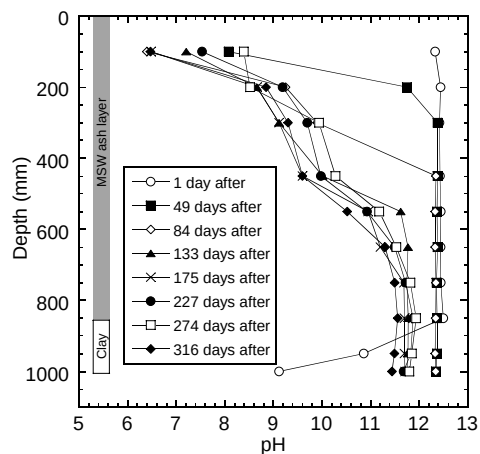


図-9 カラム内 pH 深度分布の経時変化

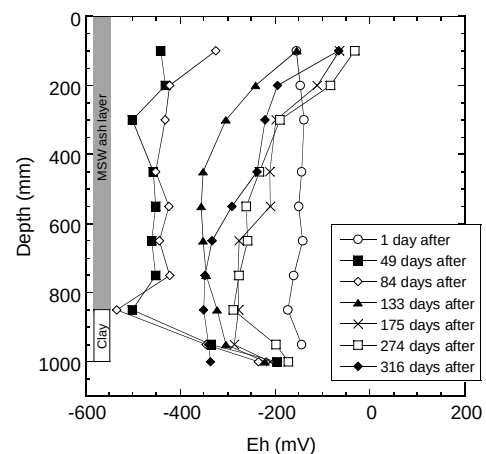


図-10 カラム内 Eh 深度分布の経時変化

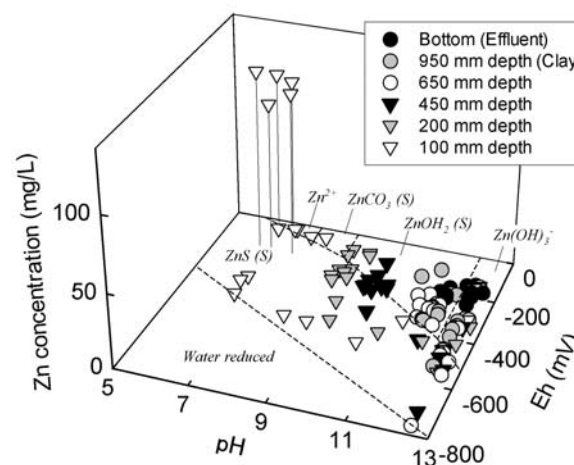


図-11 大型カラム試験における pH, Eh と Zn^{2+} の溶出量の関係

サンプリングポート以外からは、全く Zn は検出されなかったことから、Zn は $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Zn}(\text{CO}_3)$ 、 ZnS のいずれかの沈殿を形成し安定化しており、埋立層内における移動性は非常に低いと考えられる。ただし、 S^{2-} はカラム全域において終始 0.15 mg/L 程度と非常に低い値しか検出されなかったため、 ZnS の存在が重金属安定化に及ぼした影響に関しては小さいといえる。pH、の低下および Eh の上昇が同時に起こると、焼却灰層上部で確認されたように Zn^{2+} の形をとって溶出が促進される可能性がこの図から示唆され、跡地利用における覆土や表層廃棄物層の掘削においては、表層の重金属の移動性が高くなる可能性がある。しかし、焼却灰層内部においては pH、および Eh に大きな変化がみられず、焼却灰層内の重金属は安定していることから、処分場外に流出する可能性は表流水としての流出に限定できると考えられる。

・結論＝最終処分場の跡地利用に際して発生しうる、土地の掘削・構造物の建設に伴う処分場遮水工の損傷、処分場内部の生化学的雰囲気の変化に伴う重金属等の溶出や浸出水質の悪化、メタンガス・臭気等の発生、といった環境リスクを処分場の跡地利用形態と廃棄物の種別、形質変更の形態毎に抽出・整理し、それぞれのリスクの判定基準、およびリスクを抑制するための工法とその適用性を資料調査によってとりまとめた。次に、跡地利用時の施工上の技術的課題となる、(1) 遮水工構造の長期的な構造安定性の確保、(2) 鋼管杭基礎打設に伴う底部粘土層の遮水性能への影響、(3) 廃棄物層や覆土層の掘削に伴う廃棄物層内部に存在する重金属の移動性への影響、について実験的に検討を行った。(1) については、廃棄物処分場の構造上の弱面となる遮水シート、不織布、粘土層、原地盤といった遮水工を構成する材料間のせん断抵抗特性を大型せん断試験によって評価した。特に、長期的な構造安定性を検証する観点から水浸、湿潤条件でのせん断抵抗特性を評価するとともに、変位－せん断抵抗力の関係を考慮した安定性評価を行った。試験結果に基づいて、廃棄物処分場の埋立深さや勾配、地震時外力、遮水工構造をパラメトリックに変化させた数値解析を実施し、遮水工の構造安定性を簡便に評価しうるチャートを作成した。(2) については、複数の粘土試料と鋼管杭を想定した金属面の境界面からの漏水量を実験的に計測し、正規圧密状態であれば境界面からの漏水は有意ではないこと、界面透水量係数と粘土試料の透水係数には比例関係があり、粘土の透水係数から粘土－金属界面からの漏水量が推定可能であることを示した。(3) については、地盤特性、埋立規模、立地条件などから跡地利用の期待が大きい焼却灰の海面埋立処分場を対象として、廃棄物層および底部粘土層周辺における重金属の移動性を室内試験によって評価した。その結果、粘土層における微生物活動や吸着効果は重金属の固定化に寄与しうること、焼却灰層表層においては pH の低下と Eh の上昇によって重金属の移動性が高くなる可能性があるが、焼却灰層内部においては pH と Eh は安定しており、重金属も水酸化物塩、炭酸塩などを形成することによって、移動性が非常に小さいことが示された。このことから、跡地利用における覆土や表層廃棄物層の掘削においては重金属の移動性が高くなる可能性があるが、焼却灰層内の重金属は安定していることから、処分場外に流出する可能性は表流水としての流出に限定できると考えられる。以上の検討結果は一部限られた条件下での検討ではあるが、廃棄物処分場の跡地利用における環境リスクを評価する上での技術的課題を解消するための学術的知見として有用であるといえる。

英語概要

- ・ 研究課題名 = 「Effective Control of the Risk Induced by the Redevelopment of Closed Landfills with Various Execution Methods」

- ・ 研究代表者名及び所属 = Masashi Kamon (Kyoto University), Takeshi Katsumi (Kyoto University), Shinya Inazumi (Kyoto University) and Toru Inui (Kyoto University)

- ・ 要旨 (200 語以内) = Waste landfill sites are expected to create new land space after its closure. However, the potential of environmental pollution (landfill gas, leachate) and the heterogeneous physical properties of wastes should be carefully considered in the redevelopment of closed landfill sites. In this research, potential risks induced by the land use of waste landfill sites are summarized, including the execution methods for their effective control. Then three important technical issues have been studied to assess and control these risks. Firstly, large-scale shear box tests were conducted to assess the interface shear strength of composite landfill liner, based on which the structural stability of waste landfill was discussed by introducing the numerical analysis. Secondly, interface transmissivity between the steel pile and clay was experimentally assessed to assure the barrier performance of the bottom clay layer at the coastal landfill site when piles are installed through the clay layer to ensure the bearing capacity of structures constructed in the redevelopment. Finally, mobility of heavy metal in the coastal landfill sites receiving the municipal solid waste incinerator ash was examined to estimate the fate and mobility of heavy metals when excavating the cover soil and/or the waste layer in the redevelopment of landfill sites.

- ・ キーワード (5 語以内) = closed landfill, environmental risk, redevelopment, lining system,