

# ベントナイト混合土を用いた大規模廃棄物最終処分場の施工

## Construction of a Large-scale Waste Landfill Site

### Using the Bentonite Mixture Soil Liner

佐川 修二<sup>1</sup> 佐井 孝昭<sup>1</sup> 貫洞 悟<sup>1</sup> 大槻 政文<sup>1</sup> 佐々木 修<sup>2</sup>  
Shuji Sagawa Takaaki Sai Satoru Kandou Masafumi Ootsuki Osamu Sasaki  
土山 喜代美<sup>3</sup> 松崎 達也<sup>4</sup> 河野 尚司<sup>5</sup> 橋本 一郎<sup>6</sup> 佐藤 雄司<sup>2</sup>  
Kiyomi Tsuchiyama Tatsuya Matsuzaki Takashi Kawano Ichirou Hashimoto Yuji Satou

#### 【要旨】

旭川市最終処分場は、敷地面積約 180ha、埋立面積 13 万 2000 m<sup>2</sup>、埋立容量 184 万 m<sup>3</sup>（東京ドームの約 1.5 倍）で、環境や地下水への配慮から遮水構造には三要素複合ライナー（粘土ライナー、ベントナイトシート、しゃ水シート）を採用した廃棄物最終処分場では国内最大規模である。ここで米国産ベントナイトを使用した混合土を基本とした遮水構造の施工にあたり厳しい品質管理を行った結果、遮水シートの接合不具合が極めて少ない施工管理方法を確立した。また粘土ライナーの透水係数が  $1 \times 10^{-7}$  cm/秒（1nm/秒）以下という他に類を見ない遮水層を築造できた。

【キーワード】 遮水構造 三要素複合ライナー ベントナイト 粘土ライナー 遮水シート

#### 1. はじめに

旭川市廃棄物処分場（以下、旭川市最終処分場と呼ぶ。）は約 180ha（全長約 2,400m）の広さで、入口から流出防止堰堤まで約 1,800mが搬入道路、浸出水処理施設、管理棟、観察池、河川管理用道路などがあり、その奥約 600mが最終埋立処分場で埋立容量 184 万 m<sup>3</sup>、遮水構造のベントナイト混合土使用量約 28,000m<sup>3</sup>は国内最大規模である。

最終処分場建設における遮水施設の重要構成要素である遮水シートや粘土ライナー（以下、ベントナイト混合土と呼ぶ。）の施工時不具合は、周辺環境汚染に対する危険性と最終処分場建設工事に対する住民の不信・不安を生じさせる。このため、北海道旭川市では最終処分場の建設工事に際し、最終処分場の安全性と信頼性の向上を目的として、ベントナイト混合土の性能を国内基準の 10 倍を下回る値の透水係数  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 以下を要求した。さらに施工した遮水工事の内容に関しては、その責任の所在を明確にするためにトレーサビリティが要求



写真 - 1 旭川市最終処分場

された。このため、仕様書で要求された性能・事項を履行するために、従来までの施工管理に関する問題を検討し、新たな施工管理及び品質管理体制により施工を行った。

また、ベントナイト混合土は十分な遮水性を確保でき

- |                   |                       |
|-------------------|-----------------------|
| 1. 札幌支店 土木部       | 4. 名古屋支店 土木部          |
| 2. 札幌支店 草内トンネル作業所 | 5. 札幌支店 留萌ダム作業所       |
| 3. 関東土木支店 農政茂原作業所 | 6. 関東土木支店 栄第二処理場02作業所 |



図 - 1 旭川市最終処分場全体平面図

ることが最も重要である。今までに、種々の検討がなされこれに対する安全性が確認されてきているが、<sup>1), 2), 3), 4)</sup>品質管理方法についてはまだ十分には確立されていないのが現状である。そこで、今後の品質管理方法を確立していくために、基本的な遮水性能を知る目的で、実際に施工されたベントナイト混合土のブロックサンプリングより供試体を作成し、拘束圧を変えた条件で、鉛直方向と水平方向の透水性を検討した。

本報告では、旭川市最終処分場施設全体の概要と、遮水設備工施工に関する技術的成果について報告する。

## 2. 工事概要

工事件名 芳野廃棄物最終処分場(仮称)埋立地造成工事

工事場所 北海道旭川市江丹別町芳野 185

工期 平成 13 年 1 月 22 日～平成 15 年 3 月 25 日

発注者 旭川市

施工 飛島・荒井・盛永・北野・橋本・刈川・田中 共同企業体

施設規模	埋立面積	132,000 m <sup>2</sup>
	埋立容量	1,840,000m <sup>3</sup>
	敷地面積	約 180ha
	浸出水調整容量	12,700m <sup>3</sup>
	浸出水処理能力	600m <sup>3</sup> /日
	埋立対象物	家庭系・事業系一般廃棄物
	埋立期間	15 年

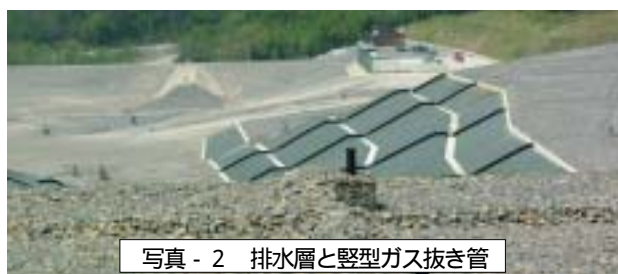


写真 - 2 排水層と堅型ガス抜き管

表 - 1 工事概要

工種	工事数量
流出防止堰堤	堤高 14.5m 延長 179m コンクリート 13,900m <sup>3</sup>
遮水設備工	埋立地造成工 (掘削 232,000m <sup>3</sup> , 盛土 132,000m <sup>3</sup> ) 粘土ライナー 28,030m <sup>3</sup> , しゃ水シート 150,700 m <sup>2</sup>
雨水集排水設備工	外周雨水排水工 L=3,000m 雨水調整地 V=4,240m <sup>3</sup>
地下水集排水設備工 (写真 - 2)	集排水管渠設置工 L=20,300m 導水管設置工 L=1,130m
保有水等集排水設備工	浸出水集排水管設置工 L=1,540m 吸水管人孔築造工, 接続人孔 一式 流出防止堰堤横断管渠 L=84m
浸出水処理設備工	浸出水調整池ほか一式 (写真 - 3) 浸出水導水管設置 L=275m 処理水導水管設置 L=776m
モニタリング設備	地下水観測用 5ヶ所
発生ガス対策設備工	法面 L=1,915m, 堅型 L=26m
防火設備工	防火水槽築造工 V=60m <sup>3</sup>
搬入道路設備工	搬入道路, 河川管理用道路, 施設管理用道路, 外周管理道路など
附帯工	ゲート設備 (写真 - 4), コンパクターヤードなど



写真 - 3 浸出水調整池



写真 - 4 ゲート設備及び浸出水処理施設

### 3. 遮水構造の概要

旭川市最終処分場は地下水汚染リスクに応じた遮水構造を有している。図 - 2 と写真 - 5 に示すように、Aエリアでは浸出水が一時滞留する可能性がある底面部分、Bエリアは浸出水が一時滞留または流れる可能性がある法面部であり、この二つは地下水を汚染する危険が最も高い部分である。このため 遮水シート 高密度ポリエチレンシートを基盤材としたベントナイトシート 粘土ライナー（ベントナイト混合土）で構成された三要素複合ライナーを採用している。

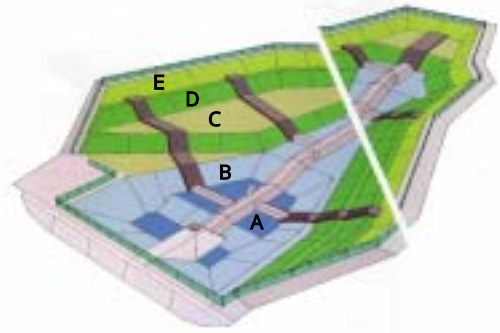


図 - 2 埋立地内の遮水構造概要図

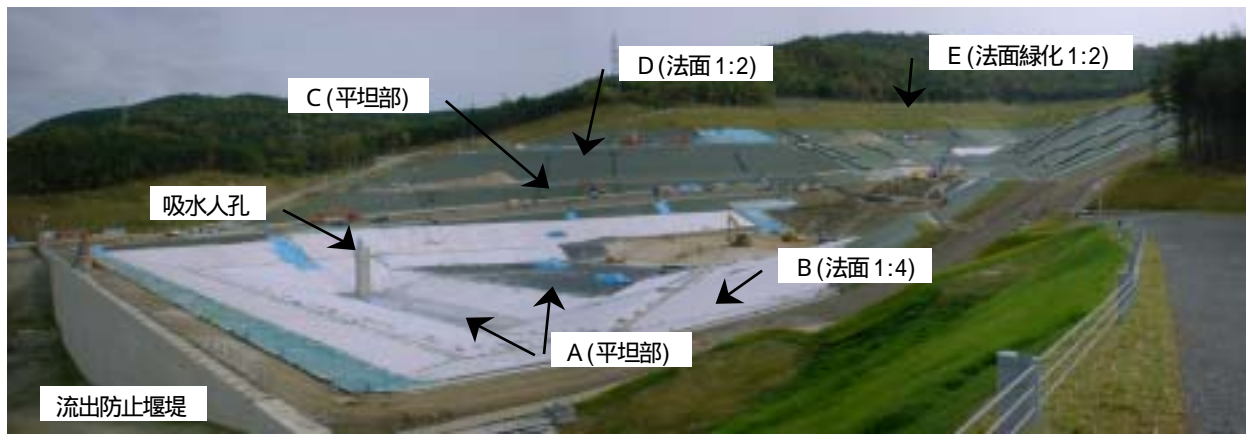


写真 - 5 埋立地内遮水工施工状況

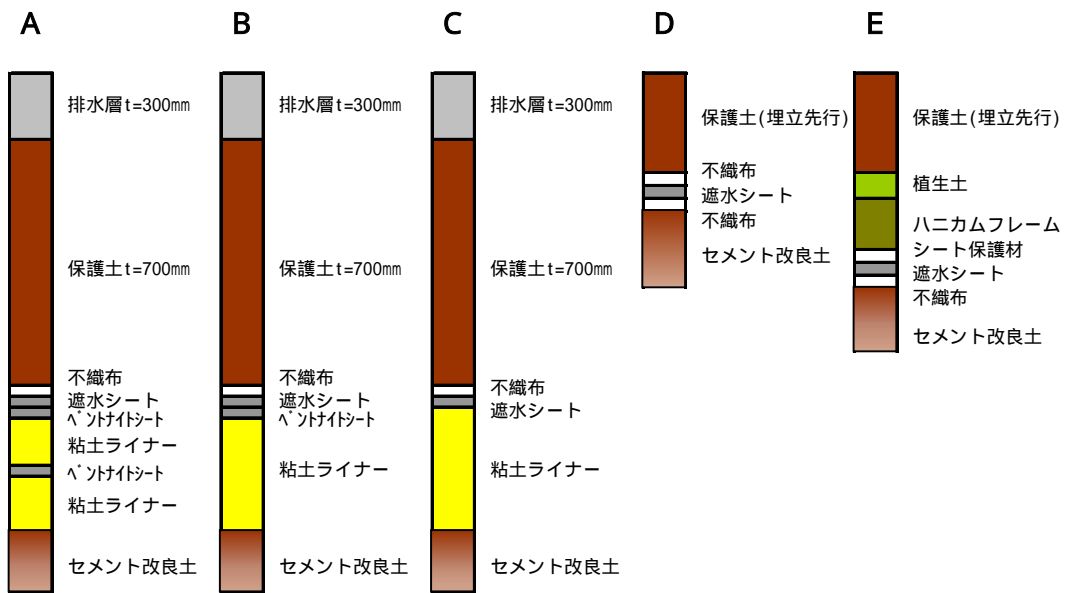


図 - 3 遮水構造詳細図

#### 4. 材料選定

旭川市最終処分場における遮水構造は、三要素複合ライナーを採用している。その品質を確保するためにはベントナイト混合土の母材と遮水シートの選定が特に重要であった。

##### 4.1 ベントナイト混合土母材選定

###### (1) 第一段階（現地発生土試験）

当初、ベントナイト混合土の母材として現地発生土を使用することになっていた。しかし、分級試験の結果、現地発生土には次のような問題があった。

礫分が多く、遮水シートが破断する可能性がある。（写真 - 6）

ベントナイトと混合するとダマ（大きな塊）が出来やすく均一な難透水層を形成することが出来ない。

このため現地発生土については不適とし、至急代替材料を探さなければならなかった。

###### (2) 第二段階（表層部火山灰試験）

着目した材料は火山灰で、表層付近の粘性を含んだ材料である。室内試験によるベントナイト混合土は十分な透水係数が得られたため、直ちにモデル施工を行った。その結果、透水係数、締め固め度、トラフィカビリティなど良好で、実施工に向け大きな期待が持たれた。

粘土ライナー施工は $t=500\text{mm}$ を2層に分けて行うものであるが、実施工において大量のベントナイト混合土の敷均し転圧を始めたところ、ローラーに混合土が付着したり、タイヤの跡がつくなど平らにすることができない状態だった。仕上げ段階になると非常に粘性が強く、それに加え気温の変化（昼夜間、晴天、曇天）により粘性が変化して施工進捗を阻害するものであった。結局、平坦性を要求される仕上げはバックホウで削り取るという、時間のかかる方法をとるしかなかった。（写真 - 7）厳しい工程を考えると施工効率の上がる材料を選択する必要があったが、最初の施工ブロックはこの材料で施工し、その間に次の母材を探すことになった。

###### (3) 第三段階（深部火山灰試験）

次に選定したのは同じ火山灰であるが、含水比は高いものの火山灰の特性であるポーラス性の強い深部の層を選択した。モデル施工の結果、施工性が良く残工程をクリアすることが可能であると判断しこれを母材として決

定した。選定理由は以下のとおりである。

混合土の粘性は気温差にあまり左右されない。

全体施工分の材料が確保できる。

仕上げ作業など作業効率が良い。

施工箇所で採取したブロックサンプリングの透水試験結果は、非常に満足出来る結果（「6. 火山灰を用いたベントナイト混合土の透水性に関する基礎的検討」参照）であった。

##### 4.2 遮水シート選定

旭川の気温は一年間で概ね $+30 \sim -30$ で60度の温度差があり、遮水シートはこれに追従できる柔軟性と耐久性が求められた。そこで母材の強度試験や溶着テストなどを経て総合的な判断により、最終的にメタロセン触媒ポリエチレンシートが採用となった。

実施工では、冬季に入ってから施工性（柔軟性）に富んでいて、夏場の高温時、冬場の低温時の収縮に追従出来る予想通りの結果を得ることができた。



写真 - 6 現地発生土分級試験



写真 - 7 粘土ライナー（ベントナイト混合土）施工状況

## 5. 最終処分場の施工管理及び品質管理事例<sup>7)</sup>

### 5.1 最終処分場の遮水構造概要

主要遮水構造の規模は、遮水シートが約 150,700 m<sup>2</sup>、ベントナイト混合土が約 28,030m<sup>3</sup>である。遮水シートには、メタロセン触媒ポリエチレンシートを、ベントナイト混合土には、砂質系火山灰土にアメリカ産ナトリウム型ベントナイトを約 14%混合した材料を採用した。

### 5.2 芳野最終処分場遮水工施工管理協議会の設立

施工時に発生する不具合を最小限に抑えるために、発注者・施工管理者・企業体・協力会社で『芳野最終処分場遮水工施工管理協議会』を設立し、不具合発生時の連絡体制・リスク回避を目標として表-2に示す「品質保持10則」を制定した。

遮水シートに関しては、遮水シート接合作業者の制限と検査者の責任を明確化した。ベントナイト混合土に関しては、ベントナイト混合土に関する講習会を実施することにより、品質管理に対するモチベーションを高めるようにした。次にその具体的な内容に関して述べる。

#### (1) 遮水シート接合作業者の制限

品質保持10則の主旨より、一定水準の技能・熟練度を有する接合作業者による遮水シートの接合を行う事を目的として、接合作業者の制限を行った。

接合作業者全員に対して、講習会と面接と接合技能試験を行い、合格者のみに接合作業を行う事の出来る資格を与える制度を設けた。試験においては、公平と公開を目的として、発注者・施工管理者・企業体職員・協力業者施工管理者の立会のもと行い、合否判定も同様に行った。

実技試験は、熱風ゴテ式自動融着機・押し溶接機・手動熱風融着機を使用し、試験の合否判定は、遮水シート各接合箇所を目視外観検査、加圧・負圧試験、剪断引張試験、剥離試験により実施した。試験合格者には、『芳野最終処分場遮水工施工管理協議会』から「接合作業資格者証」(写真-8)を発行し、だれもが確認出来るように、合格者の証であるステッカーをヘルメットに貼り付ける事を義務づけた。

#### (2) ベントナイト混合土講習会

『芳野最終処分場遮水工施工管理協議会』により、ベントナイト混合土の事前講習会を実施した。

講習会受講者の対象は、重機オペレーターを含む、ベントナイト混合土の施工に携わる全員とした。その講習の内容は、原料土・ベントナイトの管理 ベントナイト混合土の製造・保管 盛立・転圧 施工管理の4項目であり、数個のグループに分かれディスカッションを行い、予想される不具合とその判断基準を自主的に決めた。

表-2 シャ水工施工にあたっての注意事項

シャ水工施工にあたっての注意事項 (シャ水工品質保持の10則)	
当処分場は、 <b>1. シャ水シート</b> <b>2. 粘土ライナー</b> <b>3. ベントナイトシート</b>	3つのシャ水シート構造で、浸出水の漏水を防ぎます
この3つの要素の1つでも欠けると、欠陥の処分場になります。以下の現場内のルールを守っていただき、みんなで安全でよい処分場を作りましょう。	
1. くぎ、金物、工具は、シャ水シートを破る原因になります。スコップ等をうっかり直接シートの上に置かないようにしてください。	
2. 丁張り材が下地に残らないようにしてください。途中で折れた杭も埋めずにしっかり掘って除去してください。	
3. 法面等湧水面所があるようでしたら、見逃さずに各職長さんかJV職員に連絡してください。	
4. シートのシワを極力作らないように延ばしてください。	
5. シャ水シート、不織布設置後は、商品です。汚さないようにしてください。長靴の裏の泥を取ってから、上を歩いてください。	
6. 重機での破損も多いのでシートの付近で重機作業はしないでください。	
7. ベントナイトは、水に対して非常に敏感で弱い性質です。降雨に対してはシートを敷いて養生するしかないので、急な降雨時は、シート張りに協力してください。	
8. 農ビシートは、絶対に穴をあけないでください。またシワも極力なくしてください。	
9. ベントナイト混合土に燃料(ガソリン等)をこぼさないでください。	
10. シャ水工施工ヤードでの喫煙は禁止です。重機の中も禁煙です。	
もし、シャ水シート、ベントナイト、ベントナイトシート等を破損してしまった時は隠さずに職長やJV職員に申し出てください。	



写真-8 遮水シート接合作業資格者証

予想される不具合とは、測量、基盤、敷き均し、転圧、締固め度、降雨等に関するもので、これらの施工管理基準を数値化し、不具合発生時の担当責任者からの報告・連絡・是正処置方法・是正報告・再発防止対策処置をフローにまとめポスター化して建設事務所内に掲示した。また、表-3に示すような不具合に対して速やかに処置が行えるようにネットワークシュミレーションにて履行出来るまで繰り返し行い、「不具合発生時連絡体制」を整える様に実施した。

また、この講習会は施工中にも実施する事により、不具合判断基準に対する価値観の再確認と品質管理に対する全員のモチベーションを高める様にした。



写真-9 遮水シートに責任者の所在を記入

表-3 施工中の不具合項目

	不 具 合 項 目
	基盤の不具合（仕上り高さ、平坦性）
	ベントナイト混合土敷均し、転圧の不具合（撒き出し厚さ、平坦性、転圧回数）
	測量の不具合（混合土仕上り厚さ）
	ベントナイト混合土締固め度の不具合（転圧回数、転圧方法）
	降雨による不具合（シート養生）

### 5.3 遮水シート施工品質管理事例

遮水シート接合作業において接合精度に大きく影響を与える因子は、遮水シート表面温度、熱風ゴテ式自動溶着機（以下自走式溶着機と呼ぶ）の接合温度、自走式溶着機の接合速度の3点である。遮水シート表面温度は、日中約20～82℃まで大きく変化する。このため遮水シートの表面温度に応じた、自走式溶着機の接合温度や接合速度で接合作業を行うことが不具合の発生防止となる。事前に遮水シート接合部のサンプルを704点作成し、剪断引張・剥離試験を実施した。次に接合作業時に遮水シート表面温度を測定し、その結果から自走式溶着機の温度・速度が決定するように、表-4に示すようにマニュアルにより文章化した共通の基準で作業を行った。

遮水シート接合全箇所において、接合作業者と接合を検査した者の責任の所在と判定基準を明確にするために、写真-9に示すように、接合者は遮水シート接合箇所に

接合者氏名 接合日時 天候 遮水シート表面温度  
接合機番号 接合機温度の6項目を直接記入を行う様に義務づけられた。また、検査者は、遮水シート接合部に検査員氏名 検査日時 検査項目 合否判定の4項目を直接記入する様に義務づけた。ISO9001に準じて、遮水シート接合箇所に記入した内容は、「遮水シート接合管理表」を作成し文書化した。また、遮水シート接合部の不具合発生時には、その内容と施工プロセスを合わせて「遮水シート接合管理表」に併せて記入した。

表-5に示す遮水シート施工延長41.494kmの不具合結果と比較して他の事例<sup>6)</sup>を併せて示す。接合部の加圧圧力と検査時間はそれぞれ、0.15Kpa、2minである。

表-4 接合温度マニュアル

ただいまのシート温度・接合速度・接合温度状況						
シート温度	接合速度 (m/分)		接合温度 (℃)		接合速度	接合温度
	下限値	上限値	下限値	上限値	平均(m/分)	平均(℃)
1～5	0.8	～ 1.4	470.0	～ 500.0	1.1	482.9
6～10	1.1	～ 1.5	460.0	～ 490.0	1.3	473.1
11～15	1.2	～ 1.5	450.0	～ 490.0	1.4	470.9
16～20	1.3	～ 1.6	450.0	～ 480.0	1.5	467.8
21～25	1.3	～ 1.6	450.0	～ 470.0	1.5	464.5
26～30	1.4	～ 1.8	450.0	～ 480.0	1.6	462.5
31～35	1.4	～ 1.8	430.0	～ 480.0	1.6	454.4
36～40	1.4	～ 2.0	430.0	～ 470.0	1.7	450.8
41～45	1.4	～ 2.0	430.0	～ 470.0	1.7	445.2
46～50	1.6	～ 2.0	420.0	～ 460.0	1.8	441.3
51～55	1.6	～ 2.0	410.0	～ 450.0	1.8	434.2
56～60	1.8	～ 2.0	420.0	～ 450.0	1.9	432.4
61～65	1.8	～ 2.0	410.0	～ 450.0	1.9	430.0
66～70	1.8	～ 2.0	420.0	～ 420.0	1.9	420.0

#### 5.4 ベントナイト混合土品質管理事例

旭川市最終処分場におけるベントナイト混合土の施工では、表 - 6 に示すように自主管理測定 の頻度を設けて品質管理を行った。その管理方法を以下に述べる。

##### (1) 含水比管理

降雨や露による含水比増加を防ぐために、ベントナイト混合土の母材である火山灰と製造後のベントナイト混合土は、常に養生シートを敷設し仮置き・貯蔵を行った。また、ベントナイト混合土整形完了後も降雨や露による影響を防ぐために養生シートの敷設を行った。

##### (2) 表面不陸精度

ベントナイト混合土の表面を、コンクリート構造物と同等の仕上がり精度にするために、重機仕上げ作業に手元土作業員を配置し表面仕上げの施工を実施した。

また、施工サイクルの見直しを検討し、夜間作業でベントナイト混合土の盛立・転圧作業を行い、翌朝から仕上げ作業をするサイクルに変更した。このため、写真 - 10 に示すように、夜間作業でも高さ管理が必要となったため、ヒューマンエラーを最小限にするために最大 ± 50% 勾配測定可能なレーザーレベルをブルドーザーに取付けることにより夜間作業においても連続的に重機オペレーターが高さの確認をしながらの施工が可能になった。

図 - 4 に最小二乗法による平坦性の評価結果を示す。

##### (3) 締固め度・透水係数

10 t 級振動ローラーにより転圧を行い、あらかじめ室内試験により締固め度と透水係数を相関付け R I (ラジオアイソトープ測定器) で締固め密度の測定を行った。4.8 m<sup>2</sup> に 1 箇所 の頻度で R I により締固め度を測定したところ、すべての測定箇所 で規格値を満足する結果が得られ、その透水係数は 3 シグマにより管理した方法を用いた結果  $5.0 \times 10^{-9}$  cm/sec ~  $5.0 \times 10^{-8}$  cm/sec であり極めて性能の高い結果が得られた。R I の検証として、施工後に採取したブロックサンプリングを用いて、室内透水試験を実施した結果  $1.0 \times 10^{-8}$  cm/sec ~  $4.8 \times 10^{-8}$  cm/sec と 3 シグマ管理法から得られた値とほぼ同等の値が得られた。参考として、図 - 5 に各国の処分場の法基準と今回得られた性能と評価結果を示す。

表 - 5 施工管理の程度とシート破損部の関係比較

調査研究による遮水シートの損傷頻度 <sup>1)</sup>		施工実績 (孔穴数)
施工管理ランク	避けられない孔穴数	
施工管理が不良	17 個 / ha	1.6 個 / ha 接合延長約 41.5 km
通常の施工管理	8~10 個 / ha	
極めて良好な施工管理	1~2 個 / ha	

表 - 6 ベントナイト混合土管理項目表

管理項目	旭川市 管理基準値	設計 測定頻度	自主管理 測定頻度
含水比	許容範囲 10~30%・ 最適含水比 21%	混合前・転 圧後	原料土搬入時・ 混合前・盛立前・ 転圧後
表面 不陸精度	H= ± 2.5 cm・ 出来映え	10m × 10m に 1 回	5m × 5m に 1 回
締固め度・ 透水係数	Dc=90%以上・ k=1 × 10 <sup>-7</sup> cm/s 以下	500 m <sup>2</sup> に 1 回	約 48 m <sup>2</sup> に 1 回



写真 - 10 レーザーレベル作業状況

ベントナイト混合土施工歩掛は、平成 13 年施工実績 167 m<sup>2</sup>/day となり平成 14 年施工実績 282 m<sup>2</sup>/day とを比較すると、約 1.7 倍と格段に施工スピードを上げることが出来た。

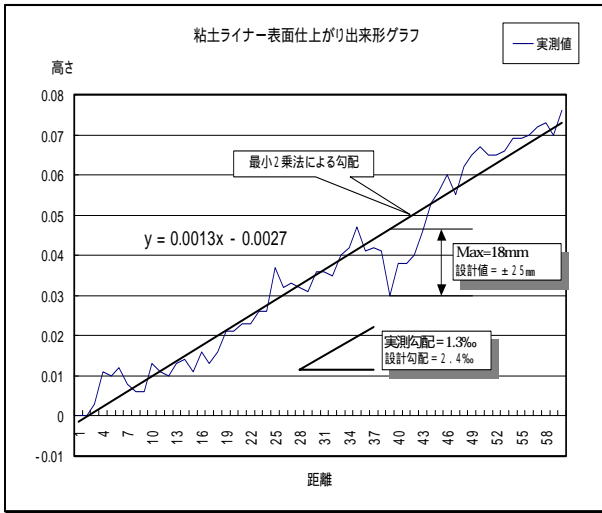


図 - 4 ベントナイト混合土表面仕上がり出来形グラフ

## 6 火山灰を用いたベントナイト混合土の透水性に関する基礎的検討<sup>8)</sup>

### 6.1 試料

ここで用いたベントナイト混合土は、砂質系火山灰にアメリカ産ナトリウム型ベントナイトを約 14%添加したものである。施工は、仕上がり厚さ 25cm で締固め度 90%となるように 10t 級振動ローラーで 6 回転圧し、これを 2 層施工し合計 50cm に仕上げられている。このような施工後、

原位置で 2 回に分けてブロックサンプリングを行い試料とした(試料 1, 試料

表-7 ベントナイト混合土の物性

		試料1	試料2
礫分	P <sub>g</sub> (%)	22	9
砂分	P <sub>s</sub> (%)	45	54
シルト分	P <sub>m</sub> (%)	15	19
粘土分	P <sub>c</sub> (%)	18	18
最大粒径	D <sub>max</sub> (mm)	37.5	26.5
土粒子の密度	s <sub>full</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2.398	2.343
含水比	w(%)	19.6	23.1
液性限界	w <sub>L</sub> (%)	146	131
塑性限界	w <sub>P</sub> (%)	31	31
塑性指数	I <sub>p</sub>	115	100
全粒径における土粒子密度			

2). それぞれの物理的性質を表-7に示す。

透水試験用の試料は、ブロックサンプリングより、直径 10cm × 高さ 5cm の供試体を切り出した。試料 1 から、鉛直方向と水平方向よりそれぞれ 2 供試体ずつ採取し、試料 2 からは各方向で 1 供試体ずつ採取した。供試体番号と透水方向を表-8に示す。このように、2 方向より供試体を採取した理由は、ベントナイト混合土は締固め度が 90%になるように極めて丁寧に転圧が行われ、最終的に 25cm の層厚に仕上げられるので、構造的な異方性が生じ、これが透水性の異方性へも影響をおよぼす可

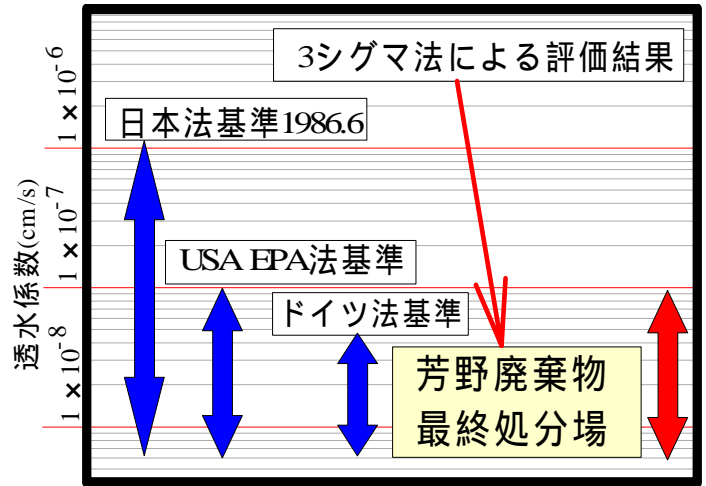


図 - 5 各国処分場法基準比較模式図

能性があると想定されたためである。

### 6.2 試験方法

それぞれの供試体は、三軸セルにセットし二酸化炭素を約 12 時間通気後、脱気水にて飽和した。その後の載荷と飽和に関する試験手順を表-9に示す。1a と 1b は、拘束圧 19.6kPa の状態で飽和化し、その後それぞれの拘束圧下で透水試験を実施した 図-6 に、圧密過程の一例を示す。

表-8 供試体番号

供試体番号	試料	透水方向
1 <sub>aV</sub>	試料1	鉛直
1 <sub>aH</sub>	試料1	水平
1 <sub>bV</sub>	試料1	鉛直
1 <sub>bH</sub>	試料1	水平
2 <sub>aV</sub>	試料2	鉛直
2 <sub>aH</sub>	試料2	水平

表-9 試験手順

試験No	項目	試験条件					
		1	2	3	4	5	6
1a	拘束圧 c(kPa)	19.6	19.6	39.2	98.0	98.0	39.2
	飽和状況	不飽和	飽和	飽和	飽和	飽和	飽和
	動水勾配 i	-	11	11	11	27	27
1b	拘束圧 c(kPa)	19.6	19.6	49.0	98.0	19.6	-
	飽和状況	不飽和	飽和	飽和	飽和	飽和	-
	動水勾配 i	-	10	10	10	10	-
2a	拘束圧 c(kPa)	19.6	98.0	98.0	49.0	19.6	-
	飽和状況	不飽和	不飽和	飽和	飽和	飽和	-
	動水勾配 i	-	28	28	28	12	-

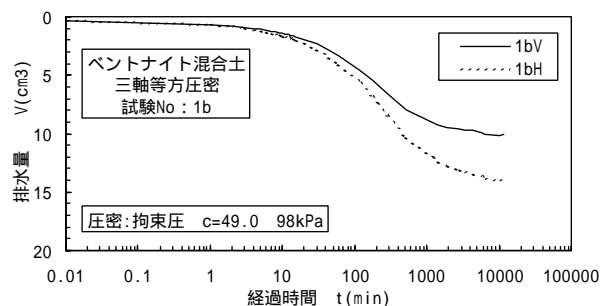


図-6 圧密過程の一例(1b)



圧密は3t法<sup>5)</sup>によって圧密の打ち切りの目安とし、概ね6~7日を要した。除荷時間は、載荷時に要した圧密時間を用いた。2aは、ベントナイト混合土を不飽和状態のまま98kPaで拘束圧を載荷し、その後飽和化を行った。これは、ベントナイト混合土は遮水シートとベントナイトシートで保護されており、ベントナイト混合土に水分が流れ出す可能性があるのは、一般的にはゴミの上載圧が載荷された後だと想定されるからである。不飽和状態で圧縮された後に飽和したときの透水性が、飽和してから圧密を行った時の透水性と異なるのであれば、このようなことを想定した試験が必要になる。上載圧は、98kPaを想定した。透水試験装置は、図-7に示す2種類の三軸セルを用いた。1aと1bは、通常タイプのセルを用いた。このセルを用いた場合は、透水中や供試体飽和時の供試体の体積変化は測定不可能なので、この間の体積変化はないものと仮定せざるを得ない。(b)の二重セルタイプは、これを解決するために、内セルと外セルに同じ拘束圧を載荷し、供試体の体積変化量を内セルの水の出入りにより計測できるようにしたものである。また、いずれの透水試験も排水量が微量であることから、感度1mgの電子秤に器を載せ排水量を質量で計測した。透水試験は、1週間以上かかるため、容器内の水面には油膜を張り水の蒸発を抑えた。また、供試体への水の供給は供試体下部より実施した。したがって高さ5cmの供試体内部では供試体内の動水勾配により有効拘束圧は大きく変化している。ここで示す拘束圧は、セルに載荷した拘束圧を示し、供試体上端部の有効拘束圧にはほぼ等しい。供試体下端部は、動水勾配分供試体上端部より有効拘束圧は小さいことになる。

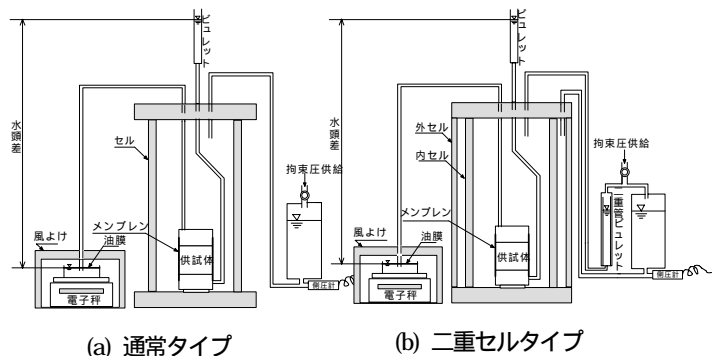


図-7 三軸セルを用いた透水試験の模式図

### 6.3 試験結果

図-8に、拘束圧と間隙比の関係を示す。載荷による間隙比の減少傾向は、飽和と不飽和で異なり、不飽和での間隙変化量が小さい。一方、除荷時は全て飽和状態であるがいずれも類似の傾向を示す。

図-9に、拘束圧と透水係数の関係を示す。透水係数はいずれの場合も、 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 以下であり、十分な遮水性能を有していることがわかる。水平方向(図中白抜き)の透水係数は、鉛直方向の透水係数よりも大きくなっている。載荷段階では、拘束圧の増加にともなって両対数紙でほぼ直線的に透水係数は低下し、除荷段階では透水係数の変化は少ないことがわかる。

図-10に、間隙比と透水係数の関係を示す。このように示すと、水平方向と鉛直方向の透水係数の違いは、透水方向の違いと言うよりも間隙比の違いとしてほぼ説明が可能であることがわかる。このように、透水方向に有意な差が認められないことは低拘束圧下の条件でも確認されている<sup>3)</sup>。図-9では不飽和状態で拘束後透水試験を実施したものは、他のものと比べ透水係数が小さい傾向があるが、この場合も間隙比との関係として図-10のように示すと、両者に違いが少ないことがわかる。

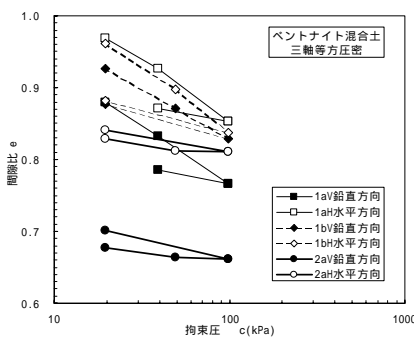


図-8 拘束圧と間隙比の関係

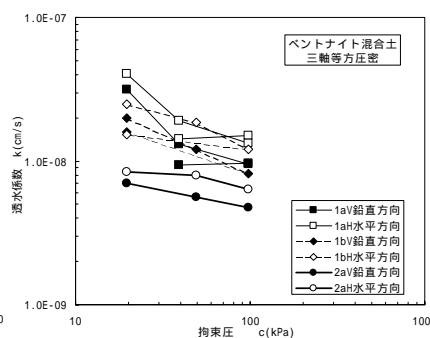


図-9 拘束圧と透水係数

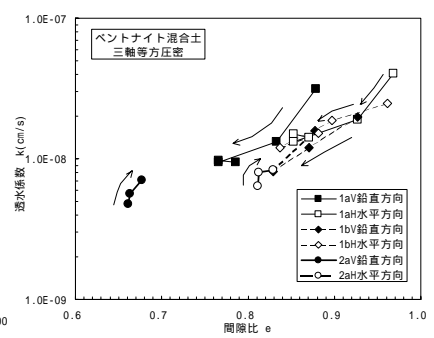


図-10 間隙比と透水係数の関係

## 7. まとめ

### (1) 施工管理及び品質管理

遮水シート接合延長 41.494 kmのうち、不具合は 22 箇所確認されたが、極めて良好な品質管理であることが示された。22 箇所の不具合については、補修を行い、結果を文書化して記録を残した。ベントナイト混合土に関しても、旭川市の基準値だけではなくドイツ連邦の法基準で要求される極めて高い性能とほぼ同等の値が得られており、良好な品質管理であることが示された。

### (2) ベントナイト混合土の透水性検討

鉛直および水平方向の透水係数は、いずれも  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$  以下であり十分な遮水性能が認められる。拘束圧 98kPa 以下の範囲では、鉛直および水平方向の透水性に有意な差は認められない。

透水係数は、拘束圧の増加にともなって低下する。

不飽和土を拘束圧 98kPa で載荷しその後飽和した透水係数は、初期より飽和した土を拘束圧 98kPa で載荷した後の透水係数と大きな差は認められない。

以上より、透水試験を行う際には、透水方向やどの段階で通水を行うかといった問題はあまり影響しないが、拘束圧や間隙比の影響は大きいのでこれらを考慮した品質管理試験が必要であることがわかる。今後、特に間隙比計測の精度を高めデータの蓄積をはかる予定である。

## 8. おわりに

今後の課題として、迷惑施設とされている最終処分場建設工事において、本論で述べた施工管理及び品質管理事例を施工に反映し、事業者ならびに地域住民に開示することにより信頼性と安全性の高い処分場建設工事を提案していく事が施工者としての責務であろう。

## 【参考文献】

- 1) 水野 克己, 岡田 朋子, 本郷 隆夫, 藤原 照幸, 嘉門 雅史: 締固めたベントナイト混合土を用いた人工地盤の性能評価事例, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 3 部門, pp.1619-1620, 2002.9.
- 2) 水野 克己, 岡田 朋子, 本郷 隆夫, 譽田 孝宏, 福田 光治, 加藤 豊: 火山灰を用いたベントナイト混合土の凍結による凍土特性, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.1175-1176, 2002.7.
- 3) 水野 克己, 岡田 朋子, 本郷 隆夫, 藤原 照幸, 嘉門 雅史: 2 種類のベントナイト混合土ブロックサンプルの密度と透水係数, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.2299-2300, 2002.7.
- 4) 三村 卓, 水野 克己, 新井 靖典, 成島 誠一: 火山灰を用いたベントナイト混合土の研究, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp.2399-2400, 2002.7.
- 5) 土質工学会編: 土質試験法(第 2 回改訂版), pp.445-446, 1979.12.
- 6) 勝見 武・Craig H. Benson・Gary J. Foose・嘉門雅史: 廃棄物処分場遮水ライナーの性能評価について, 廃棄物学会誌, vol.10, 1, pp75-85, (1999)
- 7) 松崎達也, 沼田淳紀, 関眞一, 佐井孝昭, 橋本一郎, 水野克己: 最終処分場の施工管理及び品質管理事例, 第 5 回環境地盤シンポジウム発表論文集, 2003.7.
- 8) 染谷 昇, 沼田 淳紀, 松崎 達也, 関 眞一, 筒井 雅行, 佐川 修二, 佐井 孝昭: 火山灰を用いたベントナイト混合土の透水性に関する基礎的検討, 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2411-2412, 2003.7.

**Summary** Asahikawa city's landfill site is one of Japan's largest waste landfill sites adopting triple composite lining composed of a soil-bentonite mixture (compacted clay liner), bentonite sheet, and lining sheet for its liner facility in consideration of the environment and groundwater. The facilities are outlined as follows: The site and landfill areas are approximately 180 ha and 132,000 m<sup>2</sup>, respectively, with the landfill capacity being 1,840,000 m<sup>3</sup> (about 1.5 times the capacity of the Tokyo Dome). In the construction of lining facilities using American bentonite as its basic liner component, the authors performed "smart" quality control, which was established as a construction control method that minimizes faults in connecting the lining sheets. This enabled us to construct an unprecedented liner facility achieving a permeability coefficient not exceeding 1 nm/sec ( $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ ).

**[Keywords]** liner facility, triple composite liner, bentonite, compacted clay liner, lining sheet