

信頼性の高い廃棄物最終処分場の遮水工構築に関する研究

飯 島 健 勝 又 正 治
高 木 亨 清 水 英 樹^{*1}

要 旨

廃棄物最終処分場の遮水工において、今後主流になるとと思われる「粘性土層+遮水シート」型の遮水構造を対象として、以下に示す遮水工構築方法に関する成果を得た。(1) 砂質土から細粒土までの広い粒度範囲の現地発生土を利用することが可能な遮水層吹付工法を開発した。特に、発生土の表乾工程を導入したことで、従来工法では不可能であった細粒発生土の有効利用を可能とした。当工法により構築された遮水層は、処分場遮水層としての所要の品質を満足するものであった。また、当工法の選定検討の際に有用な、ベントナイト混合に関する簡易配合設計手法を提案した。(2) 処分場の遮水シート損傷部からの漏水を模擬した土槽実験を実施した結果、漏水の浸透規模抑制のためには、遮水シートと粘性土表面の密着性が確保されることが重要であることが明らかとなった。これより、密着性向上を図る組合せである、軟質シートを不織布なしで敷設する組合せを、処分場の遮水工の最適構造として選定した。

キーワード 廃棄物処分場／遮水工／ベントナイト混合土／吹付施工／ジオシンセティックス

目 次

- | | |
|---------------|---------------|
| 1. はじめに | 3. シート遮水構造の選定 |
| 2. 遮水層吹付工法の開発 | 4. おわりに |

A STUDY ON CONSTRUCTION OF RELIABLE SEALING WORKS FOR WASTE LANDFILL

Takeshi IIJIMA
Toru TAKAKI

Masaharu KATUMATA
Hideki SHIMIZU

Synopsis:

Combination type of compacted clay and geomembrane liner has become popular as for the sealing works of waste landfill. Result of a study carried out for this sealing works is shown in the following.

(1) We developed a blasting method of construction of the sealing works which could use a material of soil of various properties. By this method, a material of the soil that could not be used was able to be made good use of till now. The sealing works made with this method satisfies standard of sealing works of waste landfill. In addition, a design approach of facility about mixing of bentonite was suggested.

(2) We executed a model test which simulated leakage from waste landfill. As a result, it became clear that it was important that an interface of geomembrane and clay surface adhered tight in order to restrain a leak of water. For the reason, combination of soft geomembrane was used and geotextile was not used was chosen as the optimum configuration.

* 1 本店 技術本部 技術部

1. はじめに

昨今、廃棄物処分場に用いられる遮水工からの漏水による周辺環境汚染などが社会的問題となっており、信頼性の高い遮水工の設計・施工技術が強く望まれている。現在、廃棄物処分場の遮水工の構造基準を定めた共同命令においては、

- ① 透水係数 $k=10^{-5}$ cm/sec 以下の不透水性地層 5m
- ② $k=10^{-6}$ cm/sec 以下の粘性土層 50cm+遮水シート
- ③ $k=10^{-7}$ cm/sec 以下のアスファルト・コンクリート層 5cm+遮水シート
- ④ 二重の遮水シート

といったいくつかのタイプの遮水構造が示されている。欧米で一般的に用いられる粘性土遮水工は、処分場建設地の地形が急峻、適切な粘性土材料の入手の困難さなどの理由により、我が国ではあまり普及しなかったが、最近では土質材料とベントナイトを混合して遮水性能を向上させたベントナイト混合土が考案され、処分場の粘性土遮水工として利用されることが多くなってきている。これは、施工時や運用時に、どうしても損傷を受けやすい遮水シートのみの構造に比べ、「粘性土層+遮水シート」の構造が、処分場からの漏水のリスクを低減できる、優れた構造と評価されているためであり、今後の処分場の遮水構造の主流になってくるものと考え¹⁾²⁾。

ここでは、この「粘性土層+遮水シート」型の遮水構造を対象とした研究成果について報告する。当研究の目的は大きく次の2点であり、これらを通して信頼性の高い遮水工構築方法の提案を行うものである。

- ① 現地発生土を用いた遮水層吹付工法の開発
- ② 粘性土層と併用して用いる保護不織布、遮水シートの選定手法の確立

2. 遮水層吹付工法の開発

2.1 研究の背景及び目的

粘性土遮水層の斜面部の施工を考えた場合、通常の高機転圧により構築するためには、緩斜面（1:3程度）とせざるを得ないのが現状である。また、急斜面の施工方法としては吹付施工が考えられるが、現地発生土を用いたベントナイト混合土の場合、塊状を呈する細粒土などは、そのまま吹付遮水工の原材料として用いることは混合性や閉塞の問題などにより困難であり、原材料にはもっぱら砂質土が用いられることが多かった。

こうした現状を鑑み、

- ① 様々な性状を持つ現地発生土に適用可能な、ベントナイト混合土による遮水層構築工法を開発することで、従来廃棄処分を余儀なくされていた現地発生土の有効利用を図る。
- ② さらに、吹付施工による遮水層構築工法とすることで、通常の高機転圧施工はもとより、急斜面にも適用可能な技術とする。

といった2点を目的として、現地発生土を用いた遮水層吹付工法（OSS(On Site Soil)吹付遮水工法）を考案し、現場実験によりその適用性を確認した。さらに、ベントナイト混合土の透水係数に影響を与える因子を調べることで、現地発生土を用いたベントナイト混合土を処分場遮水工に適用する際の簡易配合設計方法についても提案した。

2.2 現地発生土を用いた遮水層吹付工法の概要

本工法は図-1に示すように、分級機、乾燥キルン、混合機、吹付機を主体としたシステムである。図-2に本工法の施工フローを示す。

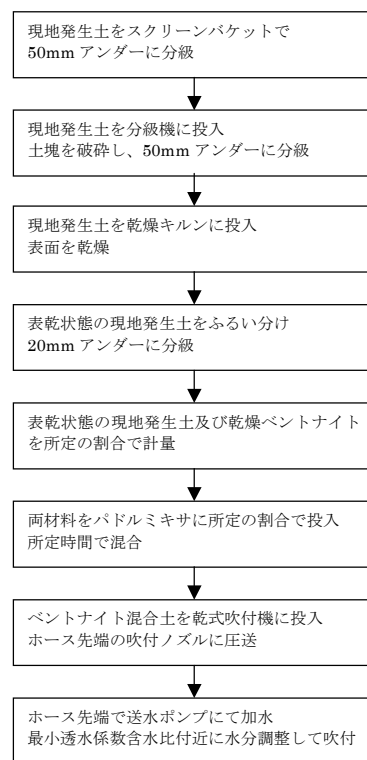


図-2 遮水層吹付工法のフロー図

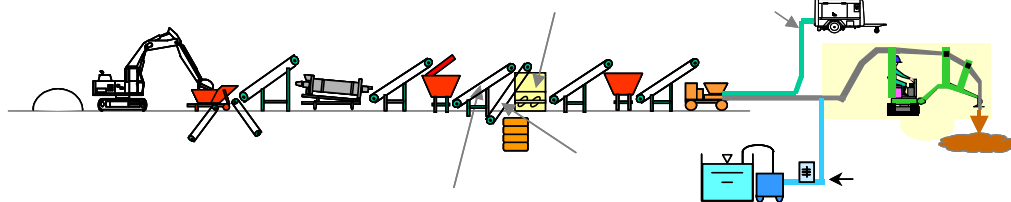


図-1 遮水層吹付工法の概要図

本工法の特徴の一つに乾燥工程がある。塊状を呈しやすすい細粒の現地発生土などは、発生土をそのままホースで圧送すると、発生土の粘着性のためにホース内で閉塞するという不具合が生じる。そこで、乾燥キルンによる表乾工程を組み込むことによりφ1～3cm程度の現地発生土の表乾粒を作り、ホース内で発生土をスムーズに圧送可能とした。また、表乾発生土とベントナイトをパドルミキサ内で所定の割合で混合することにより、発生土がベントナイトコーティングされた良好な吹き付け材料（写真-1 参照）が得られた。後述する施工実験においても、ホース及びミキサ内での閉塞や表乾発生土の再塊状化などは生じなかった。乾燥により含水比の低下した発生土は、ホース先端において最小透水係数を得る含水比付近に水分調整（加水量：6～10リットル/min）して吹き付けた。



写真-1 吹き付け材料

2.3 吹き付け施工実験

実験は乾燥キルンの乾燥温度・回転数、ベントナイト混合率及び加水量をパラメータとして実施した。吹き付けヤードは図-3に示す通りであり、遮水層の斜面部の施工を模擬した吹き付けを行った。実験後、現場密度・透水試験を実施し、締固め状態及び遮水性を確認した。

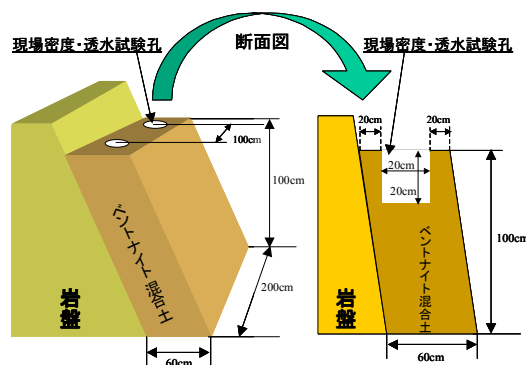


図-3 吹き付け施工実験ヤード

2.4 吹き付け施工実験結果

乾燥キルンの適正仕様は、主に目視・触感と、混合機やホース内での閉塞・再塊状化の有無などで確認した。その結果20rpm、130℃の仕様が適正であることが確認された。ベントナイト混合率、法面勾配をパラメータとした現場密度・透水試験結果を表-1に示す。当工法による吹き付け層は、ベントナイト混合率5～15%の範囲で、処分

場遮水工に要求される透水係数（ $k=10^{-6}$ cm/s以下）を確保できることが確認された。ここに、Case1～3は従来の二重シート構造の処分場の斜面勾配として一般的な1：1.5勾配であり、Case4はより急斜面の1：0.8勾配のケースである。Case4において乾燥密度が小さく、透水係数が大きな値となっているのは、急斜面への適用において吹付エネルギーが若干低下することによるものと思われる。また、ベントナイト混合率による透水係数などの仕上がり品質の違いは顕著には認められなかった。仕上がり面は、含水比やベントナイト混合状態に目立ったムラなどがなく良好な仕上がり状態であった。

本実験で用いた現地発生土は、後述するように、細粒分の多い材料であり、通常の吹付施工は困難な材料であったが、乾燥キルンによる表乾工程を組み込んだ当工法を適用することにより、処分場の遮水層吹き付け材料として利用することが可能となることが確認できた。

表-1 吹き付け施工実験結果

試験ケース	ベントナイト混合率	含水比(%)		乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	透水係数 k (cm/s)
		吹付時	密度孔		
Case1	5%	16.8	16.7	1.612	1.85E-07
Case2	12%	17.5	16.0	1.671	7.22E-07
Case3	15%	18.1	15.4	1.729	5.25E-07
Case4	12%	18.7	15.8	1.524	9.17E-07

* Case1～3 (1:1.5斜面), Case4 (1:0.8斜面)

2.5 混合材料の選定と簡易配合設計手法

ベントナイトと混合することで処分場の遮水層として利用することが可能な土質材料の範囲を明確にするため、砂質土（珪砂、まき土）から礫混り細粒材（施工実験ヤードにおける現地発生土（細粒材1、細粒材2））までの様々な性状の土質材料を対象としたベントナイト混合土を作成し、処分場の粘性土遮水層への適用性を調べた。図-4はベントナイト混合率と透水係数の関係であるが、試験に用いたいずれの土質材料もベントナイトを10%程度混合することで、処分場の粘性土遮水層の所要の透水係数である $k=1 \times 10^{-6}$ cm/s以下（現場との拘束条件等の違いを考慮して、室内透水試験においては $k=1 \times 10^{-7}$ cm/s以下が目安）を満足することが分かる。

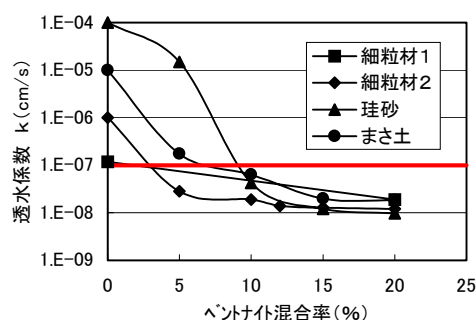


図-4 ベントナイト混合率と透水係数の関係

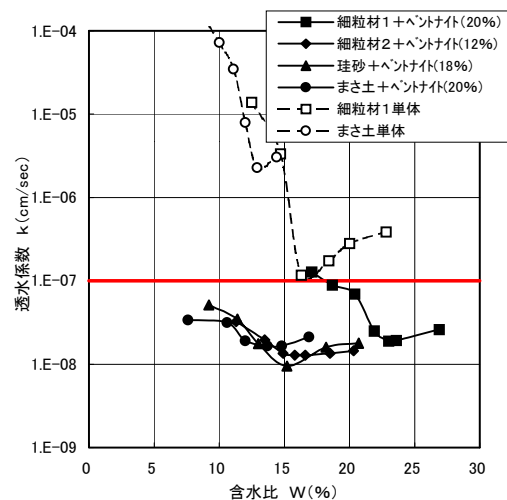
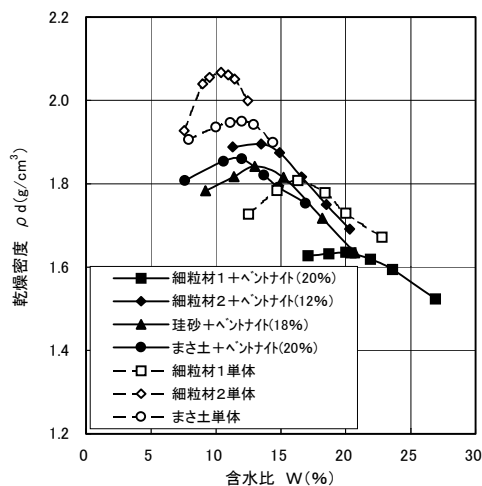


図-5 ベントナイト混合土の締固め透水特性

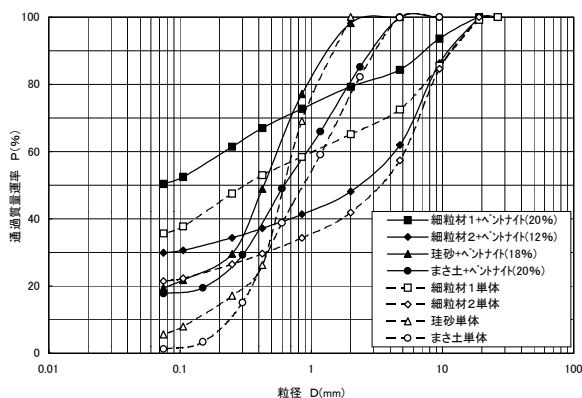


図-6 ベントナイト混合土の粒度分布

図-5、図-6 にベントナイト混合に伴う締固め透水特性及び粒度特性の変化を示す。これらより、ベントナイト混合前後の物性を比較すると、混合に伴う粒度分布の変化から想定される以上の遮水性能の向上があることが伺える。例えば、まさ土や珪砂にベントナイトを混合した場合、粒度的な変化はそれほど顕著ではなく、細粒材単体などに比べると混合土の細粒分含有率などは依然として少ないにもかかわらず、透水係数は激減している

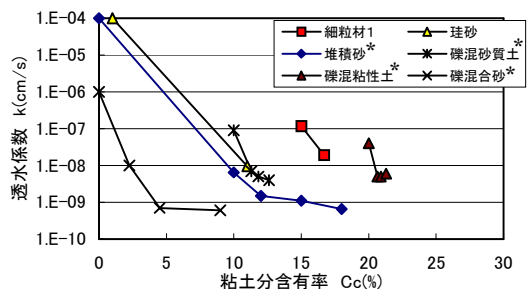
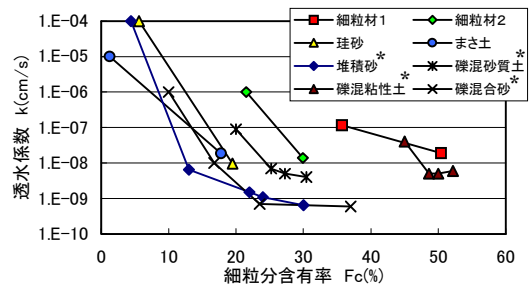


図-7 粒度因子と透水係数の関係

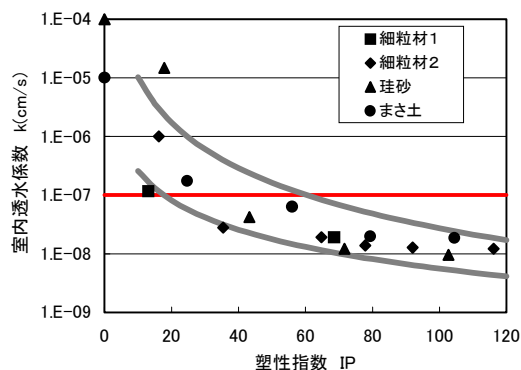


図-8 塑性指数と透水係数の関係

ことなどがその一例である。細粒分含有率や粘土分含有率といった粒度因子と透水係数の相関（図-7、図中には文献からのデータ(*)も併記）やベントナイト混合率と透水係数の相関（図-4）が各材料に個別に認められ、結局、粒度分布のみに着目してベントナイト混合土の透水係数を推定することが困難であることが分かる。

それに対し、図-8 に示す粘塑性の因子（例えば塑性指数）と透水係数の間には、材料によらず一律の相関が認められる。そこで、この相関を利用すれば、混合土対象材料となる現地発生土を選定するたびに透水試験を実施しなくても、ベントナイト混合率をパラメータとした液塑性試験のみを実施することで、当該発生土を用いたベントナイト混合土の概略の透水係数を求めることが可能となる。図-8 の例では、処分場の粘性土遮水層としての遮水性能を確保するためには、塑性指数 40 程度を目安とすればよいことが分かる。この方法はベントナイト混合土の簡易配合設計手法として利用できると考える。

3. シート遮水構造の選定

3.1 研究の背景及び目的

最終処分場の「粘性土層＋遮水シート」型の遮水工は、前章で対象とした粘性土遮水層のみならず、遮水シート、不織布（粘性土層と遮水シートの間にシートの損傷防止を目的として敷設される不織布）といった複数の材料の組合せによって構築される。遮水シートや不織布は、一般に市場に流通しているジオシンセティックス材料の中から選定されるが、各材料に求められる要求品質やそれを確認するための試験方法などが確立されていないため、合理的な選定が行えないのが現状である。合理的な複合遮水構造の選定のためには、各構成材料の性能を単独に調べるのではなく、「粘性土層～不織布～遮水シート」が一体となった際の機能を調べる必要がある。

ここでは、こうした観点から、シート損傷の際の漏水規模を最小とする各構成材料の組合せを選定することを目的として、大型土槽試験を実施した。具体的には、廃棄物処分場におけるシート損傷部からの漏水状況を模擬した土槽試験を、遮水シートの硬軟、不織布の有無及び粘性土層表面の性状（礫分の有無による凹凸度合い）をパラメータとすることで実施した。

3.2 土槽試験の概要

図-7 に試験装置の概要図を示す。大型土槽（内径 $\phi=1.5\text{m}$ 、高さ $h=1.0\text{m}$ ）の下部に碎石層（90cm）、上部に粘性土層（ベントナイト混合土層、10cm）及び不織布を敷設し、その上に中心部に $\phi=19\text{mm}$ の孔をあけ注水パイプを建込んだシートを敷設した。漏水試験においては、漏水を模擬した注水系統と廃棄物荷重を模擬した上載圧系統に分離し、所定の注水压（0.03MPa）と上載圧（空圧、0.11MPa）を作用させることで、処分場のシート損

傷部からの漏水を模擬した。試験時間は 60 分とし、試験終了後、予め 10cm メッシュのマーキングを施しておいた不織布の濡れ状況を観察し、浸透範囲を計測した。さらに、粘性土層の 5cm 深度に配置した紙玉の濡れ具合からも、深度方向への浸透度合いを確認した。

表-2 に今回行った試験ケースの一覧を示す。遮水シートは硬質と軟質の 2 種類を使用した。不織布は長繊維不織布（目付量 400g/m^2 ）を使用し、これの敷設の有無をパラメータとした。粘性土層表面の性状は、フラット地盤を模擬した試験と、表面に $\phi 3\text{cm}$ 程度の大きさの砂利を等間隔（10cm 四方に 5 個程度）に埋め込むことで礫を含む凹凸地盤を模擬した試験の 2 種類とした。以上のパラメータを組合せ、計 8 試験を実施した。

表-2 土槽試験ケース一覧

試験名	シートの種類	不織布の有無	下地表面性状
Case 1	軟質	有	フラット
Case 2		無	
Case 3		有	
Case 4	硬質	無	凹凸
Case 5		有	
Case 6		無	
Case 7	硬質	有	
Case 8		無	

3.3 土槽試験結果及び考察

試験結果を図-8 に示す。ここに使用したデータは、

- ①総流入量：試験期間中の流入量（漏水量）の累計。
- ②浸透面積：不織布の濡れ面積、又は粘性土層表面の濡れ面積。
- ③浸透度：粘性土層の 5cm 深度に点在設置した紙玉の濡れ具合をカウントした指標、
(濡れの程度)×(中心からの離れ)の合計として数値化して算出。

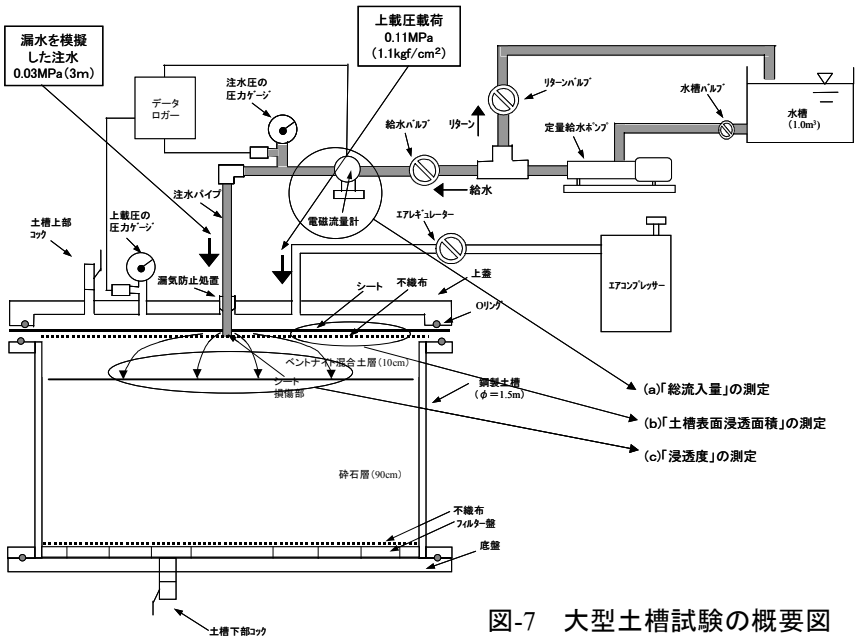


図-7 大型土槽試験の概要図

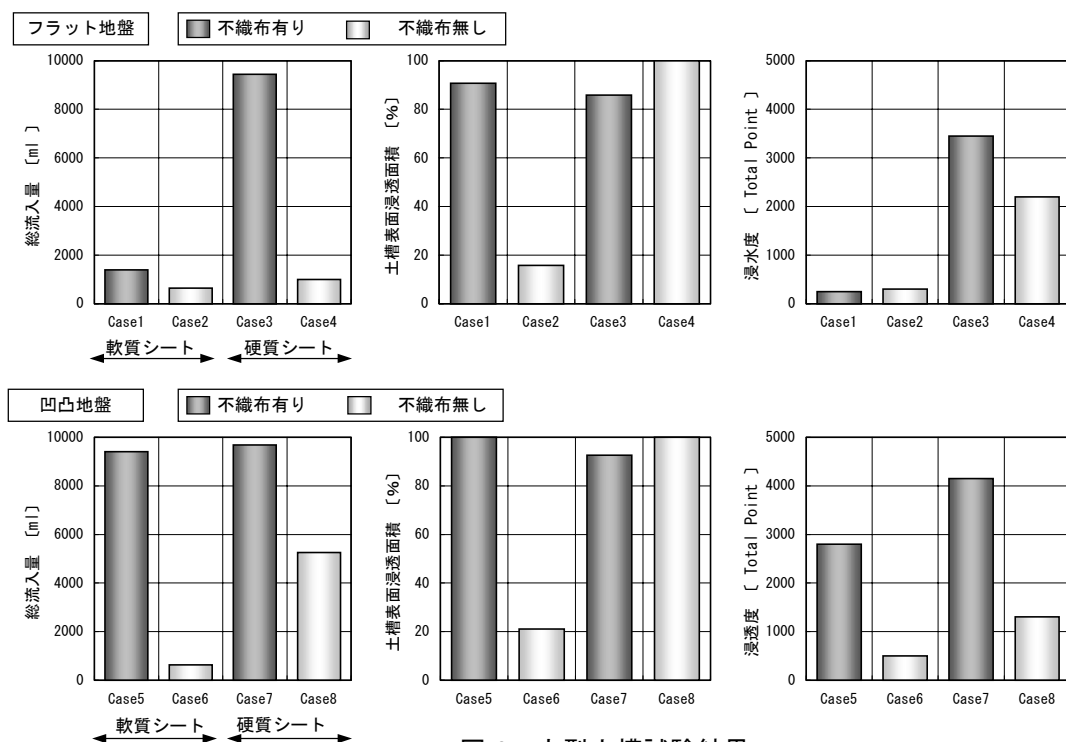


図-8 大型土槽試験結果

の3指標である。

まず、不織布の有無で比較すると、不織布がないケースの方が総流入量、浸透面積及び浸透度の値が小さくなっており、複合遮水構造としての遮水性能（シート損傷時の漏水規模の抑制性能）が向上する結果となった。これは、不織布がある場合はシートと粘性土層の境界面の空隙となる不織布を介して漏水の横方向浸透が促進され、浸透面積の拡大と浸透量の増大に至るのに対し、不織布がない場合は、シートと粘性土層の密着性が向上し、漏水の横方向浸透が抑制されるためと考えられる。試験結果の例外として、硬質シートを用いた試験において不織布の有無による浸透面積の差異が生じていないが、これは地盤追従性の悪い硬質シートでは不織布の有無に関係なく、シートと粘性土層の間に何らかの空隙が残るため、シートと粘性土層の密着性が低下し、そこに漏水が浸透しやすくなったことによるものと推察する。

シート種類で比較すると、硬質シートに比べ軟質シートを用いたケースの方が総流入量、浸透面積及び浸透度の値が小さくなっており、シート損傷時の漏水規模が抑制される結果となった。これについても、軟質シートを用いる方が、シートと粘性土層の密着性が向上し、境界面を走る横方向の浸透が抑制されるためと考えられる。こうした傾向は不織布がない場合において、より顕著に認められた。

処分場からの漏水を模擬した今回の土槽試験結果より、シートを含む複合遮水構造として「軟質シート、不織布なし」の組み合わせを選定した場合は、シートと粘性土層の密着性の向上に伴い境界部の遮水性が顕著に向上し、遮水シートが損傷した場合の漏水の広がり及び地盤中への浸透を最小にする効果があることが分かつ

た。また、この傾向は表面に礫を含む凹凸地盤においても同様に認められた。今回の評価は、ある限定された試験条件において水理的な性能にのみ着目した場合の評価ではあるが、使用条件に応じて最適な複合遮水構造を選定することの重要性を示唆するものである。処分場遮水工の性能設計へ結びつけるためには、さらに水理面と強度面の両面を考慮した設計手法の確立が必要となると考える。

4. おわりに

最終処分場における「粘性土層＋遮水シート」型の遮水構造を対象に実施した本研究における成果は以下の通りである。

- ① 広範囲な性状の現地発生土を有効利用でき、かつ急斜面に適用可能な、最終処分場の粘性土遮水層吹付工法（OSS吹付遮水工法）を開発し、その材料選定のための簡易配合設計手法を提案した。
- ② 粘性土遮水層と併用するジオシンセティックス材料としては、「軟質シート、不織布なし」の組合せがシート損傷部からの漏水を最も抑制する効果のある複合遮水構造であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 勝見他：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, No.1, pp.75-85, 1999.
- 2) Benson, C.H.: Liners and covers for waste containment, Creation of New Geo-Environment, 4th International Geotechnical Forum, pp.1-40, 2000.