

技術報文

発泡ポリウレタンの力学的保護性能の評価と 廃棄物最終処分場遮水壁の保護材としての適用

大阪府立産業技術総合研究所 西村 正樹・赤井 智幸
 太陽工業株式会社 横山 美憲・石田 正利

1. はじめに

廃棄物最終処分場に遮水シートを設置する場合、その損傷防止のための保護材として、不織布を中心としたジオシンセティックスが用いられる。発泡ポリウレタンもその一種であり¹⁾、施工現場で遮水シート表面に原液を直接吹き付け、発泡、固化させることが可能であり、また、接合部の無い連続的な施工ができるという点で、不織布とは異なった特長を有する。さらに、遮水シート表面に直接、吹き付けることによって、遮水シートに密着した保護層を形成できるという利点があり、例えば図-1に示すような、遮水シートの背面にコンクリートが裏打ちされた鉛直あるいは急勾配の遮水壁²⁾など、保護材としてのより広範な部位への適用が期待されている。

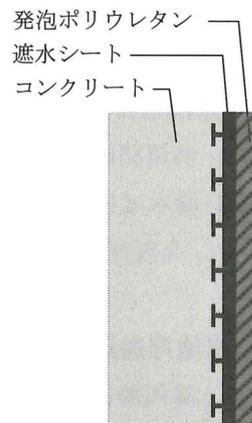


図-1 発泡ポリウレタンを用いた遮水壁の保護

しかし、保護材としての発泡ポリウレタンに関しては、材料単体での力学特性評価は行われているものの、実際の適用状況を模した条件での力学的保護性能の評価は必ずしも十分ではなく、広範な適用を図る上での課題となっている。

ここでは、まず、載荷実験³⁾によって、遮水シートと組み合わせた状態で発泡ポリウレタンの力学的保護性能を評価した結果を示す。次に、図-1に例示したほぼ鉛直と見做しうる廃棄物最終処分場急勾配遮水壁の保護材として、わが国で初めて、発泡ポリウレタンが適用された事例を紹介する。

2. 力学的保護性能の評価方法

(1) 保護材試料

載荷実験には、厚さの異なる2種類の発泡ポリウレタン（以下、「PU-A」、「PU-B」と称す。）および、比較のためにニードルパンチタイプの短繊維不織布（以下、「NW」と称す。）を用いた。各保護材の厚さおよび単位面積当たりの質量を表-1に示す。なお、PU-A、PU-Bは、実施工時に現場で使用するウレタン吹き付け発泡機によって作製したものである。すなわち、大面積の型枠の底面にポリウレタンの原液を吹き付け、自由表面で発泡成形したものを、所定の形状に切り出

表-1 各保護材試料の厚さおよび単位面積当たりの質量

	PU-A	PU-B	NW
厚さ [mm]	13.6	26.6	10.9
単位面積当たりの質量 [g/m ²]	516	992	1340

して試料としており、吹き付け量を変えることでPU-AとPU-Bを作り分けている。

(2) 載荷実験

載荷実験装置³⁾の模式図を図-2に示す。また、表-2に実験ケースを示す。ここでは、上載圧を200 kPa、300 kPa、400 kPaに設定し、保護材として不織布を用いた場合については、上載圧200 kPa、300 kPaについてのみ実験を行った。これらのうち、200 kPaは、埋め立て深さを20 mとした場合に、図-1のような鉛直遮水壁の最深部に作用する側圧に相当し、300 kPa、400 kPaは、それぞれ、その1.5倍、2倍の側圧が加わった場合に対応している。

実験は、以下の手順で行った。まず、試料箱（幅25 cm、長さ50 cm、深さ31 cm）の底面に鉄製の台を置き、その上部に遮水シート（HDPE、厚さ1.5 mm）、感圧フィルム（富士写真フィルム製 プレスケール）、保護材をこの順に設置した。鉄製の台、遮水シート、感圧フィルム、保護材の幅および長さは、いずれも試料箱と同じである。次に、保護材の上部に1号碎石を層厚15 cmとなるように敷き詰め、その重量（30.2 kg）を管理することで、一定密度の碎石層を積層した。この後、作製した遮水シート／感圧フィルム／保護材／碎石層の積層体上部から、所定の上載圧をエア

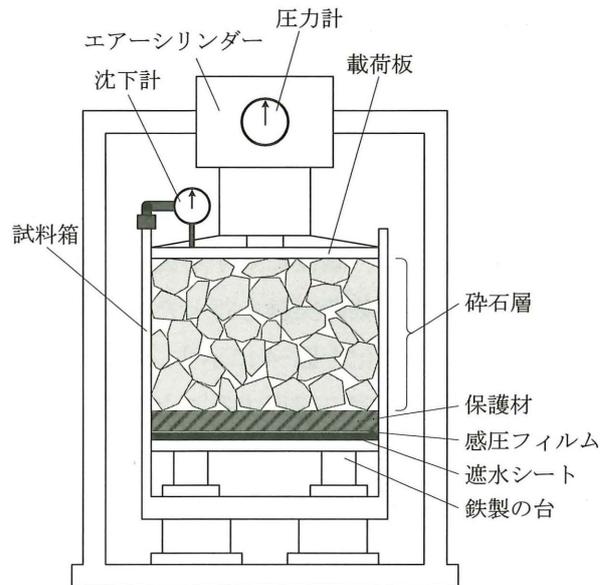


図-2 載荷実験装置の模式図

表-2 実験ケース

保護材 上載圧 [kPa]	PU-A	PU-B	NW
200	○	○	○
300	○	○	○
400	○	○	—

シリンダーによって載荷するとともに、載荷板の沈下量の経時変化を沈下計で測定した。

所定の時間、上載圧を印加し続けた後、上載圧を開放（除荷）し、積層体を構成する全ての材料を試料箱から取り出した。この後、発泡ポリウレタンを用いた実験ケースについては、図-3に示すように、発泡ポリウレタン表面の複数箇所が発生した陥没の深さ（局所陥没量）を計測した。また、画像解析システム（富士写真フィルム製 FPD-9210）を用いて、感圧フィルムにおいて検出された圧力、すなわち載荷時に遮水シートに作用した圧力を測定した。

なお、これらの実験に先立って長時間の載荷実験（予備実験）を行い、その際の沈下量経時変

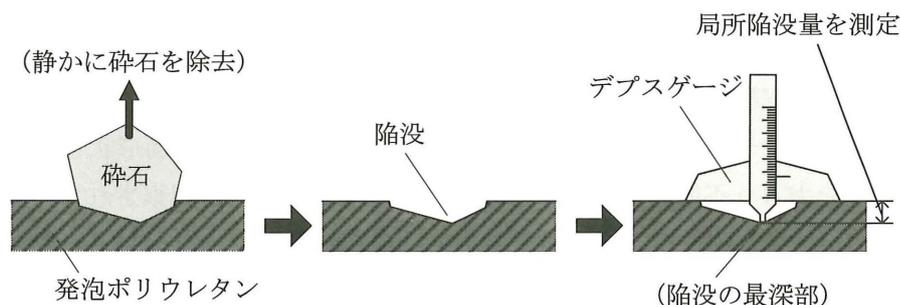


図-3 局所陥没量の測定

化の結果を基に、載荷時間を設定した。

3. 評価結果と考察

(1) 予備実験による載荷時間の設定

積層体に一定の上載圧を加えた際、全体の沈下量が一定に収束するまでの時間は、積層体の構成によって異なる。発泡ポリウレタンを保護材として用いた場合、発泡ポリウレタンの表面に発生する局所的な陥没が、積層体全体の沈下の主要因となると推測され、陥没量が一定値に達するまでには、ある程度の時間を要すると考えられる。そこで、表-1の2種類の発泡ポリウレタンのうち、厚みがあり、陥没に対する変形許容量が大きいPU-Bを用い、上載圧を200 kPa、400 kPaとして、長時間の載荷実験を行った。

沈下量の経時変化を図-4に示す。図-4より、上載圧によって絶対値は異なるものの、沈下量は概ね200時間で一定に収束することがわかった。また、沈下量をその収束値で正規化し(正規化沈下量)、経過時間に対してプロットすると、図-5が得られた。図-5より、上載圧が異なっても、正規化沈下量の経時変化がほぼ同様であることが確認された。さらに、いずれの上載圧でも、載荷開始後1時間で、沈下量は収束値の概ね75%程度に達していた。そこで、実験の効率を考慮し、表-2に示した各実験ケースでは、載荷時間を1時間に設定することとした。

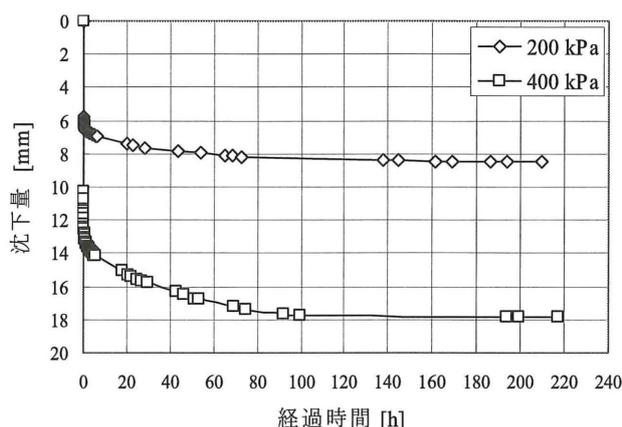


図-4 沈下量の経時変化

なお、除荷後に取り出した碎石を観察したところ、上載圧を400 kPaとした実験においてのみ、一部の碎石が割れていた。上載圧が高くなると、碎石同士の接触点に過大な応力が集中的に加わり、碎石が割断したと考えられる。したがって、上載圧400 kPaでの実験においては、碎石の割断の影響によって、碎石層自体の圧縮変形量が大きくなっていたと推測される。

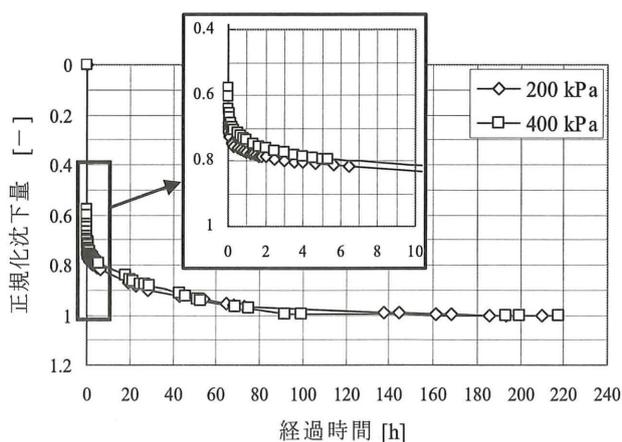
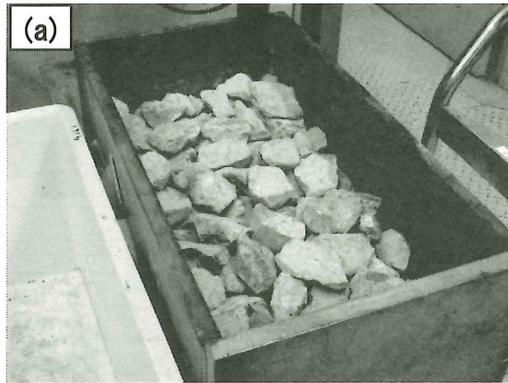


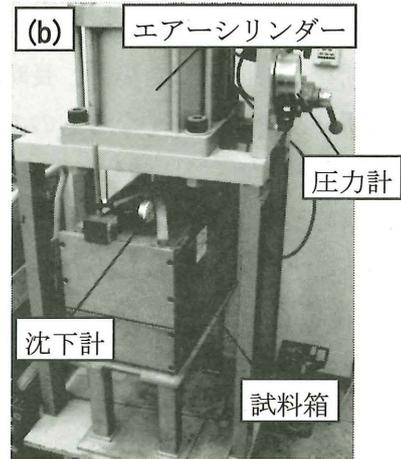
図-5 正規化沈下量と経過時間の関係

(2) 力学的保護性能の評価

表-2に示した各実験ケースについて、載荷時間を1時間として実験を行った。実験状況を図-6に示す。また、表-3は、前節で述べた予備実験を含む全ての実験ケースについて、除荷後に取り出した保護材の表面形状をまとめたものである。表-3に示すとおり、不織布においては陥没等の塑性的な変形は観察されず、初期の表面形状に回復していたが、発泡ポリウレタンは、試料面内の複数箇所で陥没が発生していた。



(a) 試料積層完了時 (載荷前)



(b) 載荷時の装置全景

図-6 載荷実験の状況

表-3 載荷実験後の保護材の表面形状

保護材 上載圧 [kPa]	PU-A	PU-B		NW
	1時間載荷	1時間載荷	長時間載荷 (約200時間)	1時間載荷
200				
300				
400				

さらに、発泡ポリウレタン表面の局所陥没量を計測し、陥没の深かった上位10箇所の最大値、最小値、平均値を求めたところ、図-7に示す結果が得られた。図-7より、上載圧が大きくなるにつれて局所陥没量は増大するが、発泡ポリウレタンの厚さが変わっても、上載圧が同じであれば

局所陥没量は同程度であることがわかった。また、载荷時間を1時間とした場合、長時間载荷時よりも局所陥没量が小さくなるものの、例えば上位10箇所の平均値と比較した場合、1時間载荷時の局所陥没量は、長時間载荷時の約80%に達していることが確認された。

なお、局所陥没量の上位10箇所の平均値を積層体の沈下量から減じることで、砕石層自体の見かけの圧縮変形量を推算したところ、上載圧が200 kPa、300 kPaの場合は2 mm以下であったが、上載圧400 kPaの場合には3~4.4 mmとなった。前節で述べたように、この差には砕石の割断が影響していると考えられる。

一方、遮水シートに加わった圧力を感圧フィルムで計測した結果、PU-Aを用い、且つ上載圧を400 kPaとした場合と、不織布を用いた場合（上載圧：200 kPaおよび300 kPa）に、局所的な圧力が検出されたが、それ以外では圧力は検出されなかった。図-8に感圧フィルムの状況を発泡ポリウレタンの表面形状と対比して示す。さらに、画像解析システムを用い、各圧力検出箇所におけるピーク圧力を算定し、上載圧に対してプロットした結果を図-9に示す。図-8および図-9より、PU-Aを用い、上載圧を400 kPaとした場合には、最も深い陥没が観察された2箇所において、44 MPa、47 MPaのピーク圧力が発生していたことがわかった。また、不織布に関しては、上載圧が200 kPa、300 kPaであっても、砕石の先端部が接触していた部分で、それぞれ23~41 MPa、18~51 MPaのピーク圧力が検出された。なお、遮水シートの表面状態を目視で観察したところ、いずれの保護材を用いた場合でも、40 MPa以上のピ

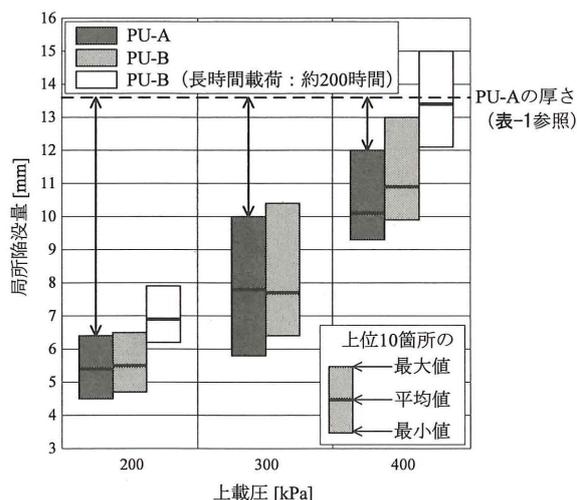


図-7 発泡ポリウレタンの局所陥没量分布

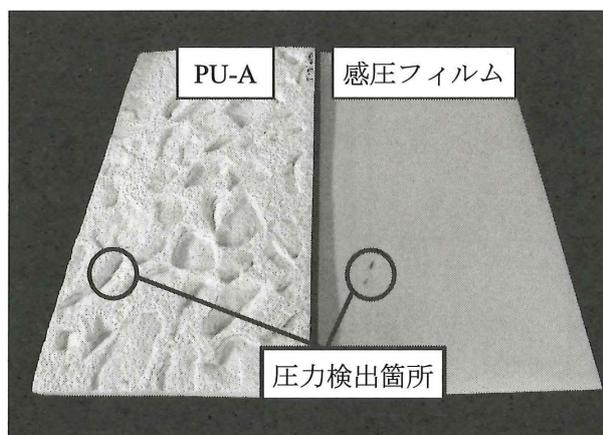
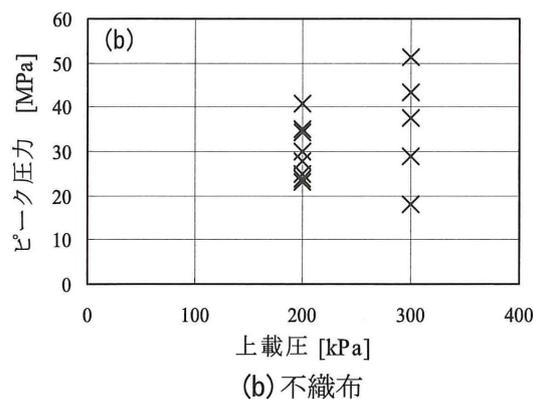
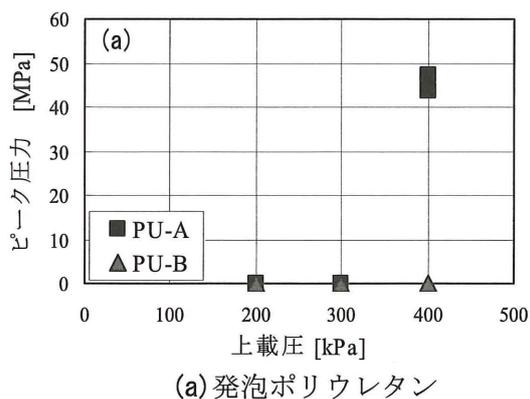


図-8 実験後の感圧フィルムの状況 (PU-A, 上載圧 400 kPa)



(a) 発泡ポリウレタン

(b) 不織布

図-9 ピーク圧力測定結果

ーク圧力が検出された箇所において、圧痕（窪み）が確認された。

以上の結果から、発泡ポリウレタンを保護材として用いた場合、陥没が遮水シートとの界面近傍にまで到達しなければ、遮水シートに圧力が作用しないことがわかった。また、極端に大きな上載圧が加わらなければ、PU-A あるいは PU-B で保護された遮水シートの表面への局所的な圧力伝播は認められなかったが、NW で保護した場合には、同じ上載圧を加えても遮水シート表面に局所的な圧力が伝わっていた。このことから、遮水シートへの圧力伝播の軽減という実用的観点で力学的保護性能を評価すると、少なくとも本実験条件の範囲では、3 種類の保護材は、PU-B > PU-A > NW の順に保護性能が高いと考えられる。

さらに、実際に発泡ポリウレタンを保護材として適用する場合には、長時間载荷による陥没量の増加等も考慮して、作用する圧力に応じた厚さを設定する必要があるが、例えば図-1 のような断面の遮水壁において、埋め立てによって最大 200 kPa 程度の側圧が作用する場合を想定すると、少なくとも 14 mm (PU-A 相当) 以上に厚さを管理することで、十分な力学的保護性能を確保できると考えられる。

4. 廃棄物最終処分場遮水壁の保護材としての適用事例

広島県内の廃棄物最終処分場拡張に伴う遮水壁延伸工事において、表面に遮水シートが設置された急勾配遮水壁に対する保護材として、わが国で初めて、発泡ポリウレタンが適用された。遮水壁の代表断面図を図-10 に示す。

なお、本工事では、図-1 に示したようなアンカー付き遮水シート (HDPE、厚さ 4 mm) が用いられており、これにより、コンクリート製擁壁の表面に遮水シートが密着した遮水壁が構築できる。すなわち、壁面のコンクリート打設時に、予め型枠内壁に沿ってアンカー付き遮水シートを設置し、コンクリートが硬化した後、脱型することにより、遮水シートとコンクリート壁面とが一体化される。また、この遮水シートの表面に、発泡ポリウレタンが直接吹き付けられ、密着・固定されるため、保護材として不織布を用いた場合と異なり、天端部での保護材の固定や、廃棄物埋め立て時に保護材の天端固定部に作用する引き込み荷重への対策は実質的に不要となる。

ここで、図-10 は工事後の廃棄物の埋め立て高さが最大となる箇所に対応しており、その埋め立て高さが 9.4 m であることから、遮水壁に作用する側圧は、最深部においても 100 kPa 弱と推算される。一方で、前章の評価結果より、発泡ポリウレタンの厚さが 14 mm 以上あれば、200 kPa の側圧が作用しても、遮水シート表面への局所的な圧力伝播は発生していない。本工事における発泡ポリウレタンの設計厚さは 20 mm であり、前章の評価結果を満足する十分な力学的保護性能が確保された設計となっている。

施工状況を図-11 に示す。施工時には、ウレタン吹き付け発泡機を用いて 2 種類の原料 (ポリオールおよびイソシアネート) を現場で混合し、同機のスプレーノズル先端から吐出させること

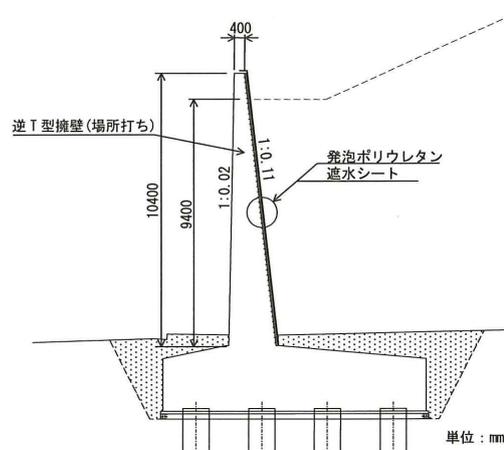


図-10 遮水壁の代表断面図

で、遮水壁面（総面積：約 220 m²）に発泡ポリウレタンを連続的に吹き付けた。発泡ポリウレタンの吹き付け作業には、高所作業車を使用した。また、設計厚さと同じ厚さに切り出した木材片を予め用意し、これを壁面に押し当てて吹き付け作業を行うことで、実際の発泡ポリウレタンの吹き付け厚さが設計厚さ以上となるように管理した。

仕上がり状況は良好で、コンクリート壁－遮水シート－発泡ポリウレタンが密着した遮水壁を構築するとともに、設計厚さ以上の厚さに管理された発泡ポリウレタンを現場で吹き付けることができた。

5. まとめ

遮水シートの保護材として発泡ポリウレタンを適用した場合を想定し、載荷実験によって発泡ポリウレタンの力学的保護性能を評価した。その結果、発泡ポリウレタンの表面に碎石等が押し当てられることによる陥没が発生しても、陥没が遮水シートとの界面近傍にまで到達しなければ、遮水シートに圧力は作用していなかったことから、実際に作用する圧力に応じて発泡ポリウレタンの厚さを設定することで、高い力学的保護性能を確保できることが確認された。

また、実際の廃棄物最終処分場の急勾配遮水壁において、発泡ポリウレタンを保護材として適用した事例について、その概要を示した。

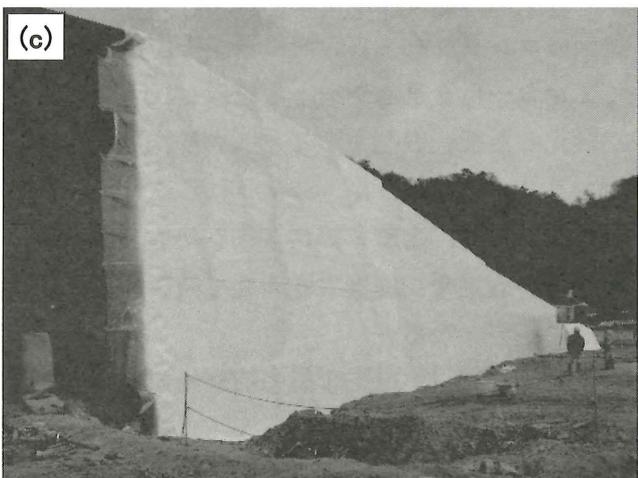
発泡ポリウレタンは、力学的保護性能をはじめとした材料物性においても、連続施工性などの施工面でも、不織布等の他の保護材とは異なる特長を有している。廃棄物最終処分場において保護材の重要性はますます高まっており^{4), 5)}、今後、それらの特長を活かすことで、さらなる展開が期待される。



(a) 遮水壁の状況



(b) 発泡ポリウレタンの吹き付け状況



(c) 発泡ポリウレタンの吹き付け完了

図-11 施工状況

参考文献

- 1) 国際ジオシンセティックス学会日本支部 ジオメンブレン技術委員会：ごみ埋立地の設計施工ハンドブックーしゃ水工技術ー，オーム社，pp. 564-565, 2000.
- 2) 古市徹，太陽工業株式会社，株式会社建設工学研究社：廃棄物処分場の構築方法，特許第3686615号，2005.
- 3) 赤井智幸，前田敏，深沢健，山田耕一，近藤誠二，松下正樹，石田正利，上田滋夫，嘉門雅史：海面処分場不織布保護マットの保護性能，ジオシンセティックス論文集，Vol. 18, pp. 13-16, 2003.
- 4) 社団法人全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計・管理要領 2010 改訂版，pp. 252-255, 2010.
- 5) 社団法人日本埋立浚渫協会：廃棄物海面処分場の施工要領(案) (改訂版)，pp. 3.15-3.19, 2009.