

現場模型実験によるベントナイト混合土層の沈降・浸透実験

宇都宮大学 学生会員 ○小野泰樹
宇都宮大学 正会員 今泉繁良

1. はじめに

最終処分場では、自然環境に悪影響を与える浸出水の浸透拡散を防ぐために遮水工の設置が義務づけられており、基準省令を満たすために、遮水工として現地発生土にベントナイトを混合したベントナイト混合土（BMS）が広く利用されている。しかし、BMS 層は遮水工下部基盤の変形に伴い、自身も変形することでクラック等が発生すると考えられるため、このような状況下での遮水機能の変化を把握することは重要である¹⁾。筆者らも²⁾、厚さ 10~20cm の模型 BMS 層に対して落とし戸実験と浸透実験を行い、亀裂の発生状況や遮水性の変化を調べてきた。

そこで本研究では、屋外実験場にて BMS 層厚 50cm、ジオネット（GN）の有無と沈下深さをそれぞれ変化させた沈降実験を行い、ビデオカメラで撮影した画像をもとにして変形に伴うクラックの発生・進行状況を観察することで許容沈下量を明らかにする。また、沈降実験終了後にクラック発生個所と無発生個所において、製作した水位計測装置を用いての浸透流量の計測や透水係数の比較を行い、遮水性能があるかどうかを検証する。

2. 使用したベントナイト混合土とジオネット

BMS の母材として、図-1 に示すように、チャート岩を破碎した最大粒径 4.75mm、礫分 13.4%、砂分 82.4%、細粒分 4.2%、 $D_{60}=1.0$ 、 $D_{30}=0.49$ 、 $D_{10}=0.23$ 、均等係数 $U_c=4.35$ 、曲率係数 $U_c'=1.04$ の日本統一土質分類では「分級された礫細粒分混じり細粒分質砂（SF-G）」となる材料を用いた。また、図-2 に示すように、液性限界 $W_L=19.3\%$ 、塑性限界 $W_p=NP$ である。土粒子密度は 2.695g/cm^3 である。これに、膨張力 38mL/2g のアメリカ産の Na 型ベントナイト（ボルクレイ）を乾燥質量比で 10%となるように添加して BMS を作成した。図-3 は、ベントナイト添加率 10%における締固め曲線であり、最適含水比 19.1% と最大乾燥密度 1.595g/cm^3 とが得られた。

ジオネットとして、高密度ポリエチレン（HDPE）が主な材料である格子幅 10mm、遮蔽率 45%、引張強度 7284N/m を持つトリカルネットを使用した。また、室温 $21\pm 2^\circ\text{C}$ 、チャック間距離（試験機に拘束するジオネット幅）を 50mm、引張速度を 10mm/min として行ったときの、引張弾性係数は 461N/mm^2 である。³⁾

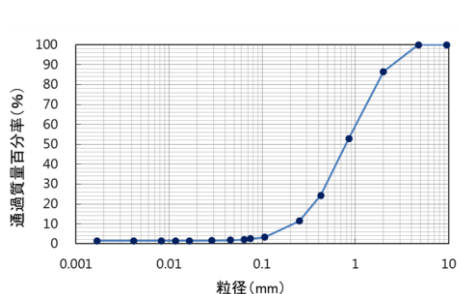


図-1 母材の粒径加積曲線

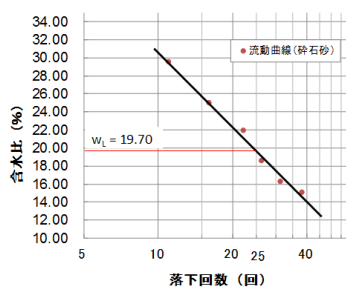


図-2 母材の流動曲線

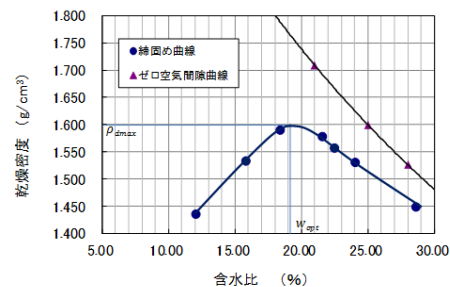


図-3 BMS の締固め曲線

3. 実験装置と実験の手順

沈降実験は GN 有で空洞深さ 10 及び 20cm、GN 無で空洞深さ 5、10 及び 20cm の計 5 ケースを実施した。浸透実験は GN 有で空洞深さ 10cm、GN 無で空洞無、5 及び 10cm の計 4 ケースを実施した。沈降実験においては、1 ケースの幅を 3.2m としてその中央の 1.2m に沈下部を設け、全 5 ケース行う。実験装置の概要と写真を図-4~6 に示す。含水比 17% となるように練った BMS を締固め度 95% になるように、一層を 12.5cm として 4 層に分けて小型振動ローラを用いて締め固める。ただし、BMS 下部にはそれぞれの実験ケースに応じた空洞が開けられるように砂抜き用単管パイプを設けた砂層を設置する。

実験の手順としては、①砂抜き用単管パイプを抜いて BMS 下部砂層を中央から両脇へ向かって徐々に掻き出し、BMS 層下部に空洞を作成して局所沈下させる。さらに、油圧ショベルで最大 4400kgf の荷重を加える。ここで、沈下の様子をビデオ撮影して、亀裂の発生状況を観察する。②沈降実験における亀裂発生個所を利用し、内径約 70cm、高さ約 95cm の高密度ポリエチレン製の円筒タンクを BMS 層上面に 5~10cm 貫入させて浸透実験を行う。作成した水位計測装置を利用して、水位の変化を記録する。

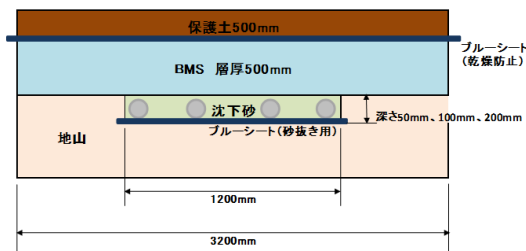


図-4 実験装置の概要図

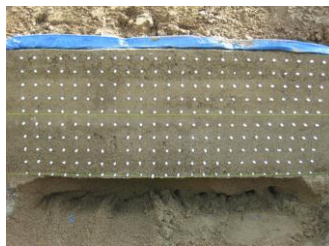


図-5 沈降実験



図-6 浸透実験装置

4. 沈降実験の結果と考察

沈降実験における全ケースの亀裂の発生・進行状況を表-1 に示す。

表-1 空洞深さの違いによる BMS 層の亀裂の発生・進行状況

		GN無						GN有			
		空洞5cm(青)		空洞10cm(緑)		空洞20cm(白)		空洞10cm(黄)		空洞20cm(赤)	
		左側	右側	左側	右側	左側	右側	左側	右側	左側	右側
亀裂の発生・進行状況	砂の掻き出し25%	-	-	-	-	12.5cm	12.5cm	-	-	-	-
	砂の掻き出し50%	-	-	12.5cm	12.5cm	37.5cm	37.5cm	-	-	12.5cm	12.5cm
	砂の掻き出し100%	12.5cm	12.5cm	25.0cm	25.0cm	50.0cm	50.0cm	12.5cm	12.5cm	25.0cm	25.0cm
	4400kgf 載荷前	25.0cm	25.0cm	37.5cm	37.5cm	-	-	37.5cm	37.5cm	37.5cm	37.5cm
	4400kgf 載荷時	37.5cm	37.5cm	50.0cm	50.0cm	-	-	50.0cm	50.0cm	50.0cm	50.0cm
	亀裂の角度	60°	45°	60°	45°	65°	65°	60°	70°	55°	55°
土層上面の状況	亀裂の幅	-		2mm		5mm		1mm		5mm以上	
	沈下量	2cm		7.5cm		14cm		6cm		17cm	
	変曲点間隔	70cm		72cm		70cm		78cm		77cm	

沈降実験では、幅 1.2m の沈下用砂層を幅中央から両脇に広げていった際の空洞が、全幅（1.2m）の 25%、50%、100%及び 4400kgf 載荷前後での亀裂の発生・進行状況を観察した。表-1 に示すように、空洞の深さが増すにつれて、亀裂の発生及び進行が早まるとともに、BMS 層上面までの亀裂貫通も早まることがわかる。それに伴い、土層上面に確認できる亀裂の幅も空洞の深さが増すにつれて大きくなる。これは、空洞深さが増加するにつれて、土層のたわみも大きくなり、亀裂が発生・進行しやすくなったと考えられる。また、GN を敷設した供試体は、敷設していない供試体に比べて亀裂の発生及び進行が遅くなることが確認できた。GN によって BMS 層のたわみ増加が抑えられたためと考えられるために、GN の有用性が確かめられた。

BMS 層の観察面に見られる亀裂の角度は、50~60° 前後にまとまっているとともに、上面が沈降する際に生じた変曲点の間隔も 74cm 前後にまとまっていることから、各ケースでの BMS 層施工におけるばらつきは少なかったといえる。図-7 は、沈下部の幅 1.2m のすべてを掻き出した時点での BMS 層の亀裂進行状況を示したものである。



図-7 砂層の掻き出し 100%の BMS 層の状況（左から、GN 無空洞 5cm、空洞 20cm、GN 有空洞 20cm）

本実験では、改善点が大きく分けて二つ挙げられる。まず、観察面を設けたためにその部分の拘束圧が 0 であったことと、単管パイプの抜き出しと砂層の掻き出しを観測面側で行った影響で、BMS 層が手前に押し出されてしまったことが挙げられる。そのために、BMS 層下部の空洞深さが増加する結果となった。本来、遮水工として利用する BMS 層は横方向に連続してこのような現象は起こらないはずである。したがって、アクリル板等を設置して、拘束圧を与えながら観測できるようにしなければならない。二つ目の点としては、BMS 層を 1 層 12.5cm の 4 層構造で施工を行ったのだが、層同士の密着性が弱くなり層間剥離が生じて、沈降中に層ごとに崩落してしま

ったことである。つまり、BMS層が一体となっておらず、材料としての本来の強度が十分に発揮されていない可能性が考えられる。対策として、施工する際に各層上面への傷つけをより念入りに行うとともに、水分や粘着性を持つ材料を吹き付ける必要がある。または、1層25cmの2層構造に切り替えることで施工の速さを上げて、乾燥を防ぎ、BMS層に一体感を持たせて層間剥離を防ぐ工夫が必要である。

5. 浸透実験の結果と考察

300cm³の水を円筒タンクに入れた時の予定水深は77.9cmであったが、全ケースにおいての水深実測値は±3cm以内に収まった。

図-8は、浸透量の時間変化を示したものである。図-8にも示すように、GNを敷設しない空洞深さ10cm供試体の浸透量が極端に増えていくことがわかる。このケースでは、浸透実験開始前の段階で、円筒タンク面に2mm以上の亀裂幅が視認でき、実験開始から約6分後に急激に水位が下がり始め、その直後にBMS層底部から水が噴き出して、開始から約15分でタンク内の水位が無くなった。実験後には、上面の亀裂幅が2倍程度に広がっている様子と洗い出されたベントナイトが観察できた。このことから、初期の亀裂幅が2mm以上になると、水の流れにベントナイトの吸水膨張が追い付かず洗い出され、水みちが押し広げられたと考えられる。

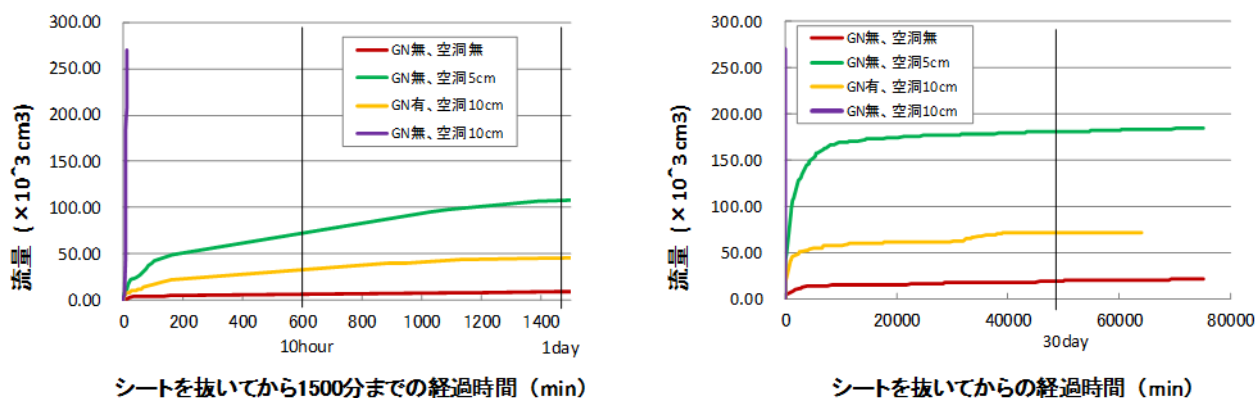


図-8 経過時間に対する浸透流量の変化

GNを敷設しない空洞無、空洞深さ5cm、GNを敷設した空洞深さ10cmの3ケースのようなBMS層上面に亀裂が確認されていない、または、亀裂幅が1mm以下のケースでは共通して、約100分までの間で急激な浸透量の増加が見られるが、その後の浸透量はケースによって約5000~10000分(約3.5~7日)をかけて勾配が減少していく。これは、ベントナイトの膨潤性が発揮されて、小さな亀裂が埋まったことに加えて、表面乾燥状態のBMS層が吸水したことが要因と考えられる。⁴⁾ しかしながら、現時点(計測継続中)でも若干の水位減少が見られる。図-6の浸透実験装置に見られるように、蒸発や雨水の侵入を防ぐ目的でビニールラップをかけているが、中央の塩化ビニルパイプの上端に直径4cmの円形状通気口が設けてあるために、蒸発による水位低下の可能性が考えられる。図-9にGNを敷設しない空洞無し及びGNを敷設した空洞深さ10cmの供試体における浸透量の変化と全天日射量⁵⁾との関係を示す(全天日射量は1日おきにプロットする)。

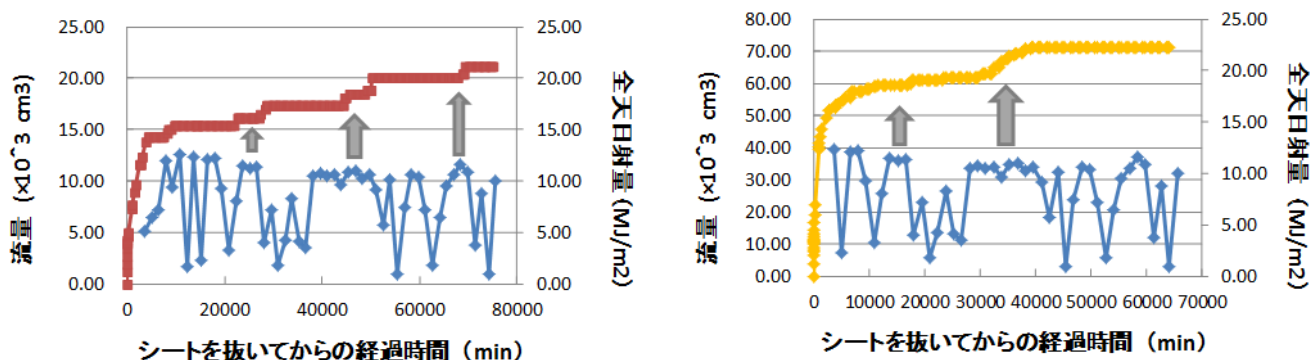


図-9 浸透量の変化と全天日射量との関係

図-9 が示すように、全天日射量が 10MJ/m^2 以上（大部分は快晴または晴）の日が 3 日以上続いたときに、水位が比較的に低下する傾向が読み取れる。このことから、浸透量の勾配がほぼ平坦になった後も若干の浸透量の増加が発生している要因として、水分の蒸発の影響が考えられる。しかし、正確な蒸発量を測定する必要がある。

また、GN の有無による違いに関して空洞深さ 10cm の供試体で比較すると、図-8 が示すように、明らかに GN を敷設した供試体の浸透量が少ないことが読み取れる。沈降実験結果と合わせて、GN の有用性が確かめられる。

6. まとめ

実験で得られた主な結果は以下のとおりである。

沈降実験に関して、

- (1) 空洞の深さが増すにつれて、亀裂の発生・進行が早まるとともに、BMS 層上面までの亀裂貫通も早まることがわかった。
- (2) 沈降実験後の BMS 層上面で確認できる亀裂の幅は、空洞の深さが増すにつれて大きくなった。
- (3) GN を敷設した供試体は、敷設していない供試体に比べて亀裂の発生・進行が遅くなることがわかり、GN の有用性が確かめられた。
- (4) BMS 層の観察面に見られる亀裂の角度は、 $50\sim 60^\circ$ 前後にまとまっているとともに、上面が沈下した際に生じた変曲点の間隔も 74cm 前後にまとまっていることから、各ケースでの BMS 層施工におけるばらつきは少なかったといえる。
- (5) 現場での土層施工においては、時間がかかるほど層間剥離を起こす危険性が高まる。

浸透実験に関して、

- (6) BMS 層上面に亀裂が確認されていない、または、亀裂幅が 1mm 以下の供試体では、初期に多少の水位変化が見られたが、約 3~5 日で収まった。これは、ベントナイトの膨潤性が発揮されて、小さな亀裂が埋まったことに加えて、表面乾燥状態の BMS 層が吸水したことが要因と考えられる。
- (7) BMS 層上面に 2mm 以上の亀裂幅が視認できる供試体は、実験開始から約 6 分後に急激に水位が下がり始め、その直後に BMS 層底部から水が噴き出して、開始から約 15 分でタンク内の水位が無くなった。
- (8) 実験後には、上面の亀裂幅が 2 倍程度に広がっている様子と洗い出されたベントナイトが観察できた。よって、初期の亀裂幅が 2mm 以上になると、水の流れにベントナイトの吸水膨張が追い付かずに洗い出され、水みちが押し広げられる可能性が考えられる。
- (9) BMS 層上面に亀裂が確認されていない、または、亀裂幅が 1mm 以下の供試体では、約 100 分までの区間で急激な浸透量の増加が見られるが、その後の浸透量はケースによって約 5000~10000 分（約 3.5~7 日）をかけて勾配が減少していった。さらにその後は、ベントナイト及び BMS 層の吸水作用が収まり、水位の変化もわずかとなり、浸透量はほぼ一定値に収束していくことがわかった。
- (10) 全天日射量が 10MJ/m^2 以上（大部分は快晴または晴）の日が 3 日以上続いたときに、水位が比較的に低下する傾向が読み取れる。これより、浸透量の勾配がほぼ平坦になった後も若干の水位低下が生じている要因として、蒸発の影響が考えられる。
- (11) GN を敷設した供試体の浸透量が明らかに少ないことが読み取れる。

総じて、BMS 層上部に約 1m の水位が存在する状況下での許容沈下量は、BMS 層下部に GN を敷設した場合は 10cm、GN を敷設しない場合は 5cm という結論が得られた。また、この許容沈下量以下の沈下であれば、遮水性能があるといえる。

謝辞

本研究は、平成 24 年度文部科学省科学研究費補助金（課題番号 23560588）の援助によって実施した。また、実験に際しては、NPO 最終処分場技術システム研究協会タスク分科会のメンバーの助言を頂くとともに、山野井碎石工業株式会社の山野井社長をはじめ社員の皆様にはご尽力して頂いた。記して感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 環境省：大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課、日本の廃棄物、p.27、2008
- 2) 藤田恭之・小野泰樹・今泉繁良：局所沈下するベントナイト混合土層の浸透性評価、第 9 回地盤工学会関東支部研究発表会、CD-ROM、2012
- 3) 大日本プラスチック株式会社ホームページ：<http://www.daipia.co.jp/>
- 4) クニミネ工業株式会社ホームページ：<http://www.kunimine.co.jp/bent/index.htm>
- 5) 国土交通省、気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>