

管理型最終処分場における ベントナイト混合土施工事例

新井靖典¹・山崎貴博¹・成島誠一¹・三村卓¹

¹正会員 西武建設株式会社 技術部 環境技術研究室（〒359-8550 埼玉県所沢市くすのき台1-11-2）

廃棄物最終処分場の建設にあたっては、雨水が廃棄物層に接触して浸出水となる。この浸出水と周辺環境とを隔離する目的で遮水工が設置される。近年、難透水性粘土層にベントナイトと現地発生土などの土砂を攪拌混合したベントナイト混合土が採用される事例が増加してきている。本報では、管理型最終処分場工事におけるベントナイト混合土について概説するとともに、工事をとおして得られた施工管理ならびに品質管理に関する留意点と遮水性の評価について詳述する。

キーワード： 廃棄物最終処分場，遮水工，ベントナイト混合土，施工管理，品質管理

1. はじめに

廃棄物最終処分場（以下処分場と記す）においては、埋立地への降雨が廃棄物層に浸潤し浸出水となる。万が一この浸出水が周辺環境に拡散すれば、地下水および土壌が汚染されてしまう。そのため地下水および土壌の汚染を防止するために、これまで処分場と周辺環境を隔離する目的で遮水シートなどの遮水工が設置されてきた。しかし、遮水シートは経年劣化が生じること、また、その厚みが1.5mm程度と薄いことなどから、その耐久性、安全性が問題視されていた。このような背景をもとに、1998年「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令」の一部改正が公布、施行され、『厚さが50cm以上あり、かつ、透水係数が $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 以下である粘土その他の材料の層の表面に遮水シートが敷設されていること』という項目が追加された。近年この難透水性粘土層にベントナイトと現地発生土や購入土などの土砂とを攪拌混合したベントナイト混合土（以下BMSLと記す）を採用する事例が増加している。その一方で、BMSLの施工管理、品質管理に関する手法は、公的な指針やマニュアルなどの整備が遅れており、工事施工会社独自の管理手法によって施工されているのが現状である。

筆者らは、旭川市、宇都宮市、宮崎市などの一般廃棄物最終処分場建設工事においてBMSLの施工を行い、その都度ノウハウを蓄積してきた。本報で

は、これまでの施工実績を踏まえ、BMSLについて概説するとともに、これらの工事をとおして得られた施工管理、品質管理に関する留意点と遮水性の評価、さらにBMSLを処分場に適用する場合の遮水構造上の留意点について詳述する。

2. ベントナイト混合土の適用例と概要

(1) BMSLの適用例

廃棄物処分場における混合土の適用例を図-1に示す。この適用例は、旭川市における遮水工の断面であり、浸出水滞留リスクに応じて遮水構造を設定していることが特徴である。この例に示すように、BMSLは、おもに浸出水滞留リスクが比較的高い

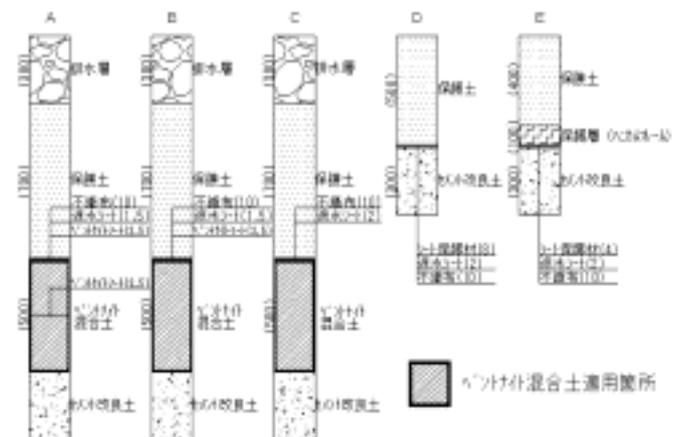


図-1 BMSLの適用例¹⁾

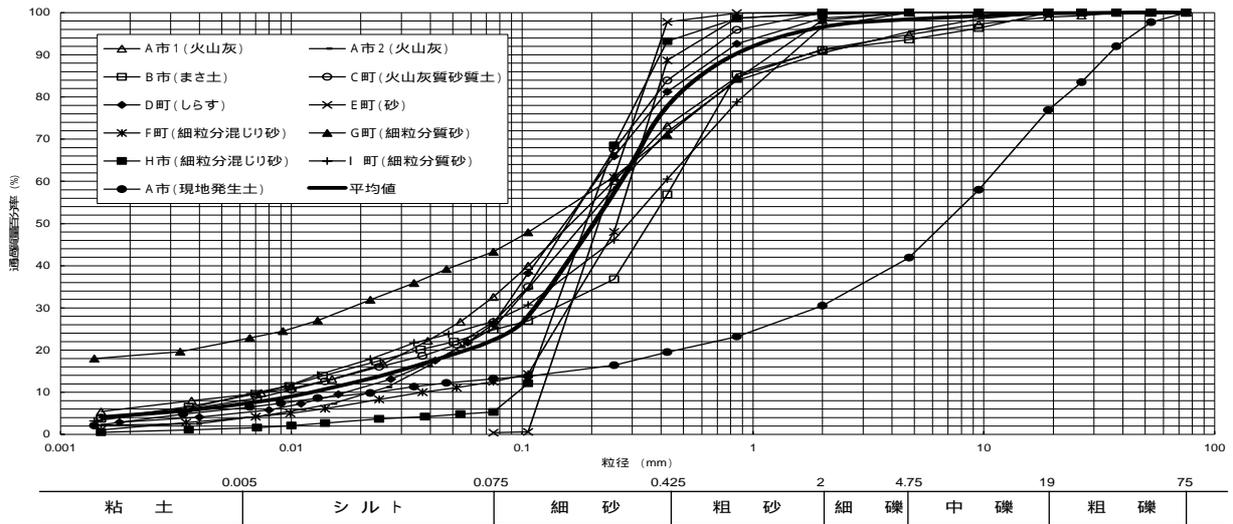


図-2 原料土の粒径加積曲線の比較²⁾

とされる処分場の底盤部や最下部の法面に適用される事例が多い。これは、BMSLが遮水シート破損時のバックアップ的機能を期待しているためである。一方、2段目以降の法面部においては、浸出水漏洩リスクが低いため、二重遮水シートやモルタル吹付+遮水シートなどの比較的低コストの構造を採用し、処分場全体としてのコストを低減させている事例が多い。

(2) BMSLの概要

BMSLの要求性能は、最大乾燥密度(d_{max})90%時において規定される透水係数が $1 \times 10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下である。原料土に対するベントナイトの混合割合は、一般に原料土の乾燥重量に対するベントナイトの質量百分率で規定され、その混合率は事例によって8%~14%と様々である。また、BMSL敷設後のせん断強度は埋立て完了後の廃棄物重量や埋立て作業時に作用するダンプトラックや重機からの荷重に耐えうるものでなくてはならない。これらの要求性能の見地からBMSLの構成要素であるベントナイト、原料土について詳述する。

a) ベントナイト

BMSLに使用されるベントナイトは、膨潤力(ASTM D5890, JBAS-104-77)と液性限界(JIS A 1250)を指標に天然Na型ベントナイトが使用されている。要求されるBMSLの遮水性に応じて国産、米国産などが選定されており、これまでの事例では、表-1に示すように、 $k = 1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ の場合には群馬県産などの国産が選定され、 $k = 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ と規定され

表-1 原料土の土質分類とBMSLの概要²⁾

原料土	土質分類	使用したベントナイト	透水係数 (cm/s)	混合方法
A市1(砂質系火山灰)	礫混じり細粒分質砂(SF-G)	スーパ-クレイ(米国産)	$k = 1 \times 10^{-7}$	自走式土質改良機
A市2(砂質系火山灰)	礫混じり細粒分質砂(SF-G)	スーパ-クレイ(米国産)	$k = 1 \times 10^{-7}$	自走式土質改良機
B市(まさ土)	礫混じり細粒分質砂(SF-G)	スーパ-クレイ(米国産)	$k = 1 \times 10^{-7}$	自走式土質改良機
C町(火山灰質砂質土)	細粒分質砂(SF)	赤城(群馬産)	$k = 1 \times 10^{-6}$	自走式土質改良機
D町(しらす)	細粒分質砂(SF)	スーパ-クレイ(米国産)	$k = 1 \times 10^{-7}$	自走式土質改良機
E町(砂)	分級された砂(SP)	赤城(群馬産)	$k = 1 \times 10^{-6}$	自走式土質改良機
F町(細粒分混じり砂)	細粒分まじり砂(S-F)	赤城(群馬産)	$k = 1 \times 10^{-6}$	自走式土質改良機
G町(細粒分質砂)	細粒分質砂(SF)	スーパ-クレイ(米国産)	$k = 1 \times 10^{-7}$	リッチタンク スケルトンバケット
H市(細粒分混じり砂)	細粒分まじり砂(S-F)	株名(群馬産)	$k = 1 \times 10^{-6}$	スタビライザー
I町(細粒分混じり砂)	細粒分質砂(SF)	赤城(群馬産)	$k = 1 \times 10^{-6}$	自走式土質改良機

る場合においては米国(ワイオミング)産のベントナイトが選定されている。

b) 原料土

BMSLの原料土には、現地発生材や購入土が使用されてきた。しかし、現地発生材を原料土に使用するような設計においては、事実上BMSLの製造ができないといった事例が見受けられた。これは、現場から発生する土砂を使用することにより経済性を高めようという試みであるが、現地発生材を使用する便益に比べて施工の困難な材料を使用することによる経済的損失の方が大きくなるといった状況を想定していないために生じている。このような状況の背景には、BMSLの原料土に対する明確な規定が存在していないことに主たる原因があると考えられる。図-2にこれまで実績のある9現場10種類の原料土の粒径加積曲線を示す。この図から、これまで

BMSLの原料土に用いられた土砂の粒度分布は、ある一定の範囲内に集中している状況がわかる。なお、これらを平均した粒度分布を太線で示した。この太線で示す土砂は、土質分類上、細粒分質砂(SF)に属する。また、表-1に示した10事例の原料土の土質分類では、礫混じり細粒分質砂を含めると9事例の原料土がこの分類に属する。さらに、残りの1事例の原料土も分級された砂であり、BMSLの原料土には、粗粒土のなかの砂に分類されるものが選定されてきたといえる。図-2には、ある現場の現地発生材の粒径加積曲線を併記したが、この材料は、試験混合の結果、原料土として不適切と判断された材料である。この材料の場合は、礫分の混入が多くベントナイトと均一に混合することが困難であった。

また、これまでの施工経験から原料土の自然含水比は、最適含水比 w_{opt} 付近、あるいは2~3%程度乾燥側の状態にある場合において均一に混合されやすいことがわかっている。これは、細粒分が多く混入し、粘性に富み、最適含水比に比べ著しく自然含水比の高い土砂においては、ベントナイトを均一に攪拌することは困難であり、さらに敷設時においては、こね返しによる著しい強度低下が発生することを示唆している。これらのことから、原料土の自然含水比は、BMSL施工後のトラフィカビリティを考慮し、コーン指数(qc)を指標として規定する。すなわち、BMSLが締固め度(D_c)90%時において、ダンプトラックが走行可能な qc 1200kN/m²を満たす含水比の範囲をBMSLの原料土の規格値とする。

3. 施工手順

図-3にBMSLの施工フローを示す。また、以下に各項目の説明および留意点を述べる。

(1) 事前調査～施工計画

事前調査として原料土やベントナイトなどの材料選定や配合設計を行い、現地発生材の使用の可否検討、製造ヤードの位置選定等を行う。特に製造ヤードに必要な面積は、ヤード内にBMSLを仮置きせずに敷設現場に直送する場合であっても500m²程度必要であり、BMSLを仮置き保管する場合には、その保管量にもよるが、およそ2,000~3,000m²程度の用地を確保する必要がある。

施工計画では、BMSLの施工が降雨による影響を多分に受けることを考慮し、工事期間を可能な限

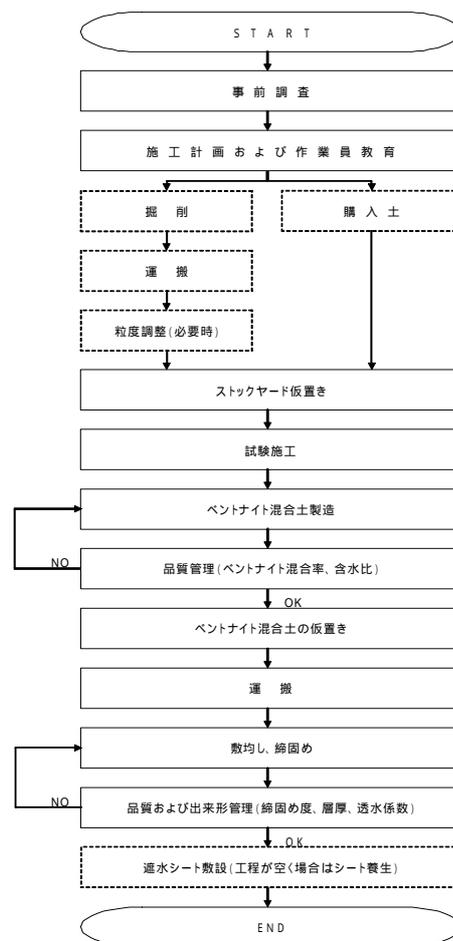


図-3 BMSL施工フロー図

り乾期に計画する。やむを得ず工事期間が多雨期と重なる場合には、BMSLの養生方法、雨水排水対策などの実施が必要である。

(2) 作業員教育

BMSLの施工は一見、通常の盛土工事と類似しており現場で実際に作業する重機オペレータや作業員に『遮水構造物を構築しているのだ』という自覚を持たせることが難しい。それに加えて、施工の失敗や手抜きなどは処分場供用開始後の浸出水漏洩につながるおそれ大きい。そのため、実際に現場で施工に従事する作業員に対して、BMSLの遮水層としての役割、施工時の禁止事項、品質管理基準などの教育を行うことが肝要である。こうした認識を背景に、旭川市の事例では、BMSLの製造(混合対象土の品質管理から製造したBMSLの養生まで)とBMSLの施工(基盤から締固めたBMSLの養生まで)の2グループに分けてディスカッションを実施し、予測される不具合(降雨による泥土化、混合ムラ、原料土の含水比上昇など)とその判定基

準と対策，また担当責任者と連絡体制を決め，現場の運営に役立てた．この事例のように，単に教育を実施するだけではなく，不具合の判定基準に対する価値観の確認と品質管理に対する意識の統一が品質の確保につながると考える．

(3)混合土製造

BMSLの製造方法には，大別すると表-2に示すように，プラント攪拌混合方式，原位置攪拌混合方式がある．近年では，現場での利便性や混合精度などを考慮し，プラント攪拌混合方式の一種である，自走式土質改良機による製造が一般的となっている．この方式は，混合機が自走式であるため，定置式プラント方式に比べ，大規模な製造ヤードの手配やプラント自体の建設をする必要がなく，現場に搬入してから数日で作業を開始できる利点がある．

(4)混合土敷設

BMSLの敷設は，ブルドーザ，バックホウ，振動ローラなどによる通常の盛土工事と同様の施工を基本としているが，上面に敷設される遮水シートとの密着性が重要であるため，特に平坦性を確保することを求められる．このことから，写真-1に示すコンクリートフィニッシャーを応用した施工を試験的に行っている．また，一般の振動ローラによる転圧が困難である法面部においては，写真-2に示すクローラ駆動式ローラによる転圧が有効である．

BMSLの敷設完了後，遮水シートが施工されるまでの間，降雨によるBMSLの泥土化やエロージョンを防止するために，シート等で養生する．

4．BMSLの品質管理

表-3に品質管理項目を示す．大別すると，施工中，施工後に実施する項目に分けられ，施工中には，おもにベントナイト混合率と乾燥密度の測定を，施工後には透水試験を行う．BMSLは，母材となる原料土にベントナイトを攪拌混合し人工的に難透水性粘土を製造するため，ベントナイト混合率は重要な管理項目である．また，土は乾燥密度の増大とともに土粒子の間隙が減少し，遮水性が高まることから，所定の密度に締固められることが肝要である．さらに，施工後の遮水性を確認する目的で透水試験を事後評価として実施する．以下に品質管理における，おもな項目の説明と留意点を述べる．

表-2 BMSLの攪拌混合方式

混合方式	プラント攪拌混合方式	原位置攪拌混合方式
使用機械	自走式土質改良機 定置式プラント	バックホウ スタビライザー
特徴	・大量に均一な品質の混合土を製造することが可能 ・プラントの設置費用がかかる	・混合量の施工管理が困難である ・混合ムラが生じやすいため、材料の割り増しが必要である



写真-1 コンクリートフィニッシャーによるBMSL敷設状況



写真-2 クローラ駆動式ローラによる転圧状況

表-3 BMSL品質管理項目

段階	確認項目	実施する試験内容	規定値(例)
施工時	原料土の含水比	電子レンジを用いた土の含水比試験	3% w 36%
	ベントナイト混合率	ファン粘着試験	25.6秒以上
		メレンゲ [®] 水-溶液吸着試験	51.7ml/5g以上
	混合土の含水比	電子レンジを用いた土の含水比試験	3% w 36%
	基礎地盤の強度	コーン試験	1200kN/m ² 以上
施工後	乾燥密度	R I計器による土の密度試験	90%以上
	層厚	スケールによる実測	50cm以上
	平坦性	目視およびスケールによる実測	2.5cm/100cm以内
	透水係数	室内透水試験	1 × 10 ⁻⁷ cm/s以下

(1)ベントナイト混合率の管理方法

これまで、ベントナイト混合率の管理は、ファンネル粘性試験（以下Fv 試験と記す）、メチレンブルー溶液吸着試験（以下MBC 試験と記す）を併用して行ってきた。Fv 試験は簡便性に優れ、短時間で測定することができるため、日常の品質管理に適用し、MBC 試験は自走式土質改良機のキャリブレーション時などに実施するのが一般的である。しかし、これまでの工事経験から、Fv 試験は試験方法の性質上、原料土の性状のばらつきによる影響を除去できないため、現地発生材を使用する現場においては適用が困難であることがわかってきた。そのため、現地発生材を使用する場合は、日常管理についても性状のばらつきの影響を受けにくいMBC 試験を適用することが妥当であると考えられる。このような観点から、原料土の性状に左右されにくく、短時間でベントナイト混合率を判別できるBMSL懸濁液の電気伝導率（写真-3 参照）を指標とした管理手法を開発中である。



写真-3 電気伝導率を指標とした混合率判定試験状況

表-4 宮崎市処分場におけるBMSLの仕様

管理項目	規格値
ベントナイト混合率	乾燥重量比 8%以上
乾燥密度	1.548g/cm ³ 以上(Dc 90%)
透水係数	k 1×10 ⁻⁷ cm/s

(2)乾燥密度の測定

乾燥密度の測定方法として砂置換法、RI法がある。砂置換法は、測定結果が試験者の熟練度に左右されやすいことに加えて、測定時間が長く、その場で確認することができない。一方、RI法は測定者による誤差が少なく、測定結果もその場で確認することができるため、RI法を用いて乾燥密度を管理することを基本とする。試験の実施頻度は、BMSLの日当たり施工量から勘案して、500m²/回としている。

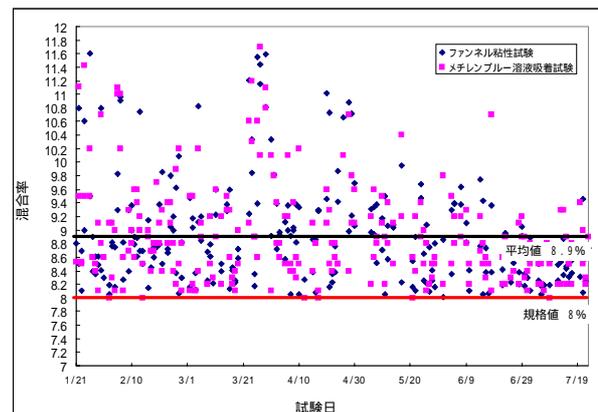


図-4 ベントナイト混合率の経日変化³⁾

(3)透水試験

BMSLの透水係数は、現場透水試験またはブロックサンプルを用いた室内透水試験により得られる。処分場では、BMSLが難透水性であるため測定に時間を要すること、現場透水試験の実施が困難なことなどの理由から、おもに後者が適用されている。実施頻度は、処分場の規模や形状によって500～5000m²/回とまちまちであるが、これまでの実績では、おおむね1現場当たり10回程度実施している。

本処分場の仕様は表-4に示すとおりである。

(1)ベントナイト混合率

図-4にベントナイト混合率の経日変化を示す。規格値8%に対して平均値が8.9%であり、さらに8%以下はなく工事期間をとおして所定の混合率を有したBMSLであることがわかる。

(2)乾燥密度と含水比

図-5に乾燥密度と含水比の関係を示す。すべての測点において規格値である締固め度Dc=90%（1.548g/cm³）の値以上で施工されていることがわかる。さらに、法面部と底盤部の施工のばらつきを3シグマ法により評価すると、法面部の乾燥密度は1.700±0.145g/cm³（1.555～1.845g/cm³）であり、底盤部の乾燥密度は1.678±0.114g/cm³（1.564～1.792

5. 遮水性の評価

これまでの工事では、BMSLの遮水性をベントナイト混合率と乾燥密度によって評価する手法をとっている。以下に宮崎市で行ったBMSL工事の事例をもとに、遮水性の評価について論じる。なお、

g/cm³) の範囲に分布している．最低値がDc=90%の値以上であることから，乾燥密度を測定していない箇所においても規格値を満たしていると推定される．このような統計的手法を用いることにより，面的な性能評価ができる．

6．施工上の問題点と対応策

処分場は遮水工を有しているため表面の遮水性が高い．その反面，ごみで処分場内が埋まるまでの間は遮水工裏面からの湧水に対して非常に弱い構造である．そのため，遮水工裏面には地下水集排水管を過不足無く張り巡らせる必要がある．また，BMSLは水分に対して非常に弱い性質を有しているため，湧水が発生すると泥土化し，その機能が著しく低下する．ある事例では，法面部の地下水集排水管の設置が不十分な箇所があり，その部分から被圧した地下水が混合土層を突き破り遮水シートと混合土の中間層に流出するといった問題が生じた（写真-4 参照）．このような状況を防止するには，地下水集排水管とBMSL等の遮水工との間に一定の距離を保ち，BMSLと地下水とが直接接触しない構造とすることが望ましい．図-6 に示す地下水集排水管の設置例では，セメント改良土とベントナイトシートによってBMSLと地下水との接触を遮断している．また，法面部における湧水発生箇所では，点ではなく面で湧水を受ける構造（例えば面状排水材やふとん籠の設置）にすることが必要である．

7．まとめ

以上，処分場におけるBMSLの施工フローから品質管理等について論じた．まとめを以下に示す．

BMSLの原料土には，土質分類上(SF)に属し混合性の良い材料を選定する．

原料土に現地発生材を使用する場合には，Fv 試験の適用に留意する必要がある．

遮水性の評価は統計的手法を取り入れることにより，施工面全体の評価が可能である．

BMSLの採用にあたっては，地下水の処理を確実に行うことが肝要である．

BMSLはベントナイトの持つ耐久性，安全性が評価され，採用される事例が増加しているが，比較的新しい工法である．今後も施工をとおした技術の蓄積に励み，BMSLの信頼性を高めていきたい．

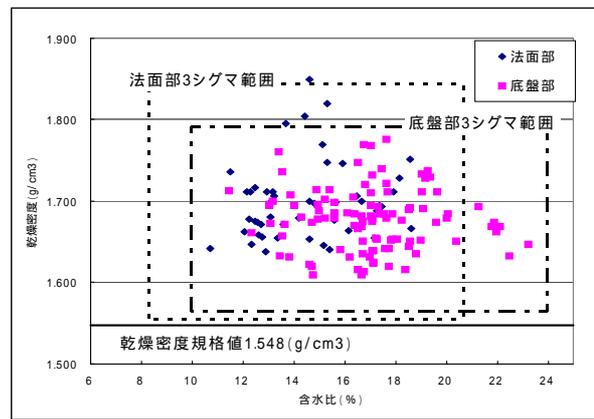


図-5 乾燥密度と含水比の関係³⁾



写真-4 湧水の状況

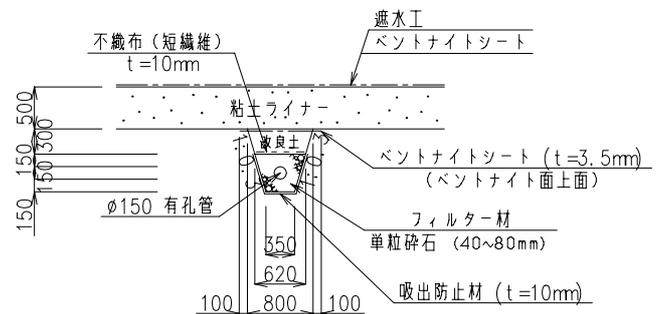


図-6 地下水集排水管の設置例

参考文献

- 1) 遠藤和人，岡田朋子，水野克己，本郷隆夫，西垣誠，嘉門雅史：供用開始後の最終処分場における底部遮水工の環境ストレスの調査，ジオシンセティックス論文集第19巻，pp.127-132，2004．
- 2) 成島誠一，水野克己，市川隆文，大塚義一，西山勝栄，小嶋平三，中村隆浩，関真一：ベントナイト混合土を用いた複合ライナーの品質管理とデザインに関する研究，第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.83-88，2003．
- 3) 山崎貴博：宮崎県廃棄物総合処理センター整備事業管理型最終処分場におけるベントナイト混合土施工報告，西武建設㈱平成16年度土木技術発表会講演集，pp.21-23，2004．