

アスファルト・ベントナイト混入遮水材の 敷設実証実験および品質評価法

森 雄治¹・押方利郎²・白井直人³・海老原正明⁴
檜垣貫司⁵・樋口雄一⁶・藤原斉郁⁵

¹正会員 大成建設 土木本部（〒163-0606 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル）

²工博 大成建設 エコロジー本部（〒163-0606 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル）

³正会員 工修 大成建設 エコロジー本部（〒163-0606 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル）

⁴正会員 工博 大成建設 エコロジー本部（〒163-0606 新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル）

⁵正会員 工修 大成建設 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

⁶正会員 工博 大成建設 技術センター（〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1）

廃棄物最終処分場を新設する際、限られた用地内で埋立容量を確保するために法面勾配を1：2とする計画が増えている。遮水工としてのベントナイト混合土は、発生土を有効利用できる点、遮水性の面で優れているが、急勾配では転圧が困難となる。また工程上、遮水シート敷設までに日数を要する場合、遮水材には耐侵食性が求められる。そこで、遮水材に澆水性および粘着力を持たせて耐侵食性を高めるためベントナイト混合土にアスファルト乳剤を添加した配合を検討し、さらに締固めを必要としない吹付け材料を開発した。要素試験および実証実験により、強度および遮水性が目標性能を確保することを確認した。また1年間の曝露によってもガリ侵食を生じなかった。

キーワード：廃棄物、最終処分場、遮水工、吹付け、アスファルト

1. はじめに

廃棄物最終処分場を新設する際、限られた用地内で埋立容量を少しでも多く確保するために法面勾配を1：2の急勾配とする計画が増えている。このような急勾配法面にベントナイト混合土などの土質系遮水材を適用しようとする、締固めが難しい、降雨による侵食を受けやすいなどの問題を生じる場合がある。

筆者らは上記の問題を解決するために、従来のベントナイト混合土にアスファルト乳剤を混入した吹付け可能な遮水材料を新たに開発した¹⁾。本論文では、まず既往の土質系遮水材であるベントナイト混合土を法面に敷設する際の留意点と解決すべき課題について述べ、次に新たに開発したアスファルト・ベントナイト混入遮水材の材料特性を示し、最後に実際の処分場の一面にて実施した敷設実証実験の結果を示す。

2. 既往材料の留意点と吹付け遮水材の目標性能

ベントナイト混合土は、現地発生土を有効利用できる点、難透水性、吸着能を有する点等で優れ、廃棄物最終処分場の遮水工としての適用実績も増えている。この材料は、適正量のベントナイトを添加し所定の密度に締固めることによって、目標とする遮水性能を発揮する。したがって、同材料を法面に適用する際にも確実な転圧を実施する必要がある。1：3程度の勾配であれば、底盤部と同様に振動ローラーなどの重機を用いた効率的な転圧が可能であるが、法面勾配が1：2の場合には斜面に段切りを施し振動ローラーにより転圧した後に所定の勾配の法面に整形する、などの工夫が必要となる。また、ベントナイト混合土は斜面上に敷設した後、降雨に曝されると雨量によってはガリ侵食を生じる場合がある。混合土の敷設後、速やかに上部遮水シートを敷設する場合には問題ないが、工程上、遮水シートの敷設までに日数を要する場合等には、遮水材に耐侵食性を持

表－１ 吹付け遮水材の目標性能

項 目	目標性能	備 考
透水係数	$\leq 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$	構造基準 5)イ(1)(ロ)
一軸圧縮強度	$\geq 50 \text{ kN/m}^2$	斜面安定性の検討より
施工目標層厚	$\geq 8 \text{ cm}$	
最低層厚	$\geq 5 \text{ cm}$	構造基準 5)イ(1)(ロ)

表－２ 吹付け遮水材の配合（出来上がり 1m^3 あたり）

材 料	砂	ベントナイト	アスファルト乳剤	水
仕 様	細骨材	群馬産 250 メッシュ	ノニオン系	水道水
配合量	1,369 kg	137 kg	171 L	94 L

たせることが必要となる。

そこで、遮水材に澆水性および粘着力を持たせることによって耐侵食性を高めることを目的とし、既往のベントナイト混合土にアスファルト乳剤を添加する配合を検討し、さらに締固めを必要としない吹付け材料を開発することとした（以下、単に吹付け遮水材と呼ぶ）。

吹付け遮水材に求められる性能は、処分場構造基準（基準省令）²⁾等にしたがい表－１に示す通りとし、室内試験及び吹付け実験を繰返し、目標性能を満足する配合として表－２に示す配合を選定した。吹き付け直後は粘性により遮水層が保持されることから、ダレなどの変形が生じない限り１週間で目標強度を達成することを目標とする。

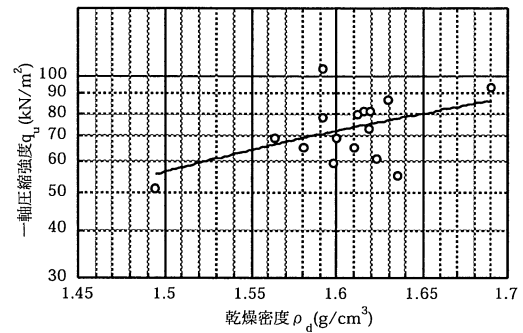
なお、アスファルト乳剤に添加されている乳化剤は、天然高級エーテルを主原料としたもので、いわゆる環境ホルモンに該当せず、ラットに対する LD50 値が $5,000\text{mg/kg}$ 以上で「實際上毒性なし」に分類されている安全な材料である。

３．吹付け遮水材の材料特性

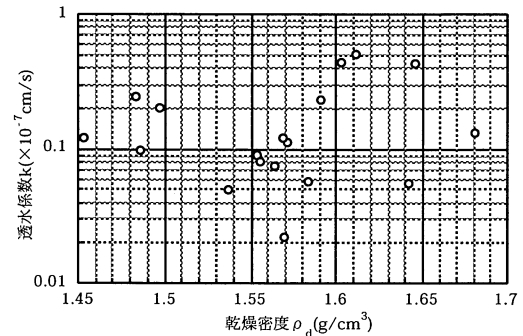
吹付け遮水材の特性を把握する目的で実施した吹付け実験および要素試験の結果を以下に示す。

(1) 吹付け実験結果

吹き付け実験は、表－２に示した配合の砂、ベントナイトおよび調整水を混練し２インチ管で空気圧送し、これとは別系統でアスファルト乳剤をスクイズポンプにより送り、先端ノズルで混合し、実験ヤードにて法面（幅 $10\text{m} \times$ 法長さ 7m 、法面勾配 $1:1$ ）に吹付けたものである。吹付け１



図－１ 遮水材の ρ_d と q_u の関係



図－２ 遮水材の ρ_d と k の関係

日後、法面にサンプリングチューブ（内径φ 5cm ）を押し込み、透水試験および強度試験用の供試体を採取し、１週間以内に試験に供した。

a) 一軸圧縮強度

一軸圧縮強度 q_u は、図－１に示すように多少の変動を含むものの、目標強度である 50kN/m^2 を上回っている。また q_u は、ほぼ乾燥密度 ρ_d に比例して増加していることが分かる。これは強度が、砂およびベントナイトで構成される骨格の密度に大きく依存するためである。

b) 透水係数

図－２に示すように、透水係数 k は目標値である $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ を満足しているが、乾燥密度 ρ_d と k には明確な相関がみられない。これは、透水係数は、密度だけでなく間隙寸法の分布やベントナイトの膨潤程度等にも依存しているためと考えられる。

c) 材料の均質性

本吹付け材料は、先端ノズルで材料を混合する点および圧送圧による締固め効果を期待している点で、品質の変動が若干、大きめになることが避けられない。そこで要素試験の終了後、供試体に含まれるアスファルト分およびベントナイト分を、それぞれソックスレー抽出法、メチレンブルー法

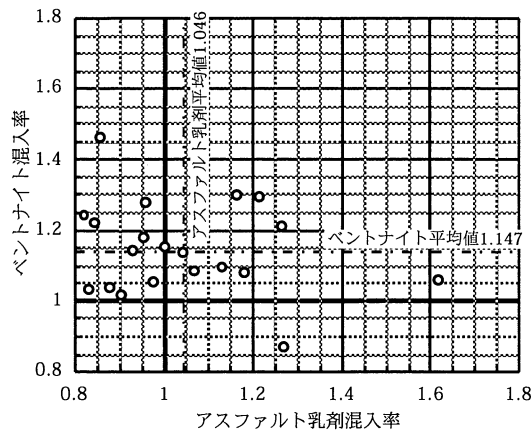


図-3 吹付けられた材料の均質性

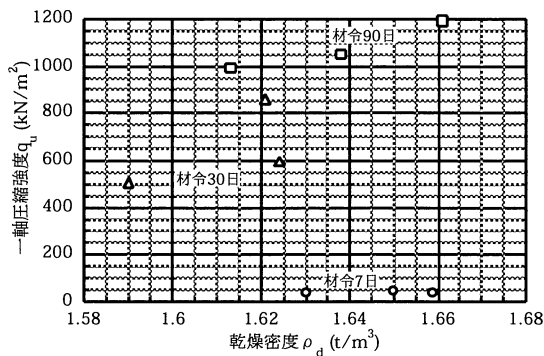


図-4 乾燥密度と一軸圧縮強度の関係
(○ : 材令7日, △ : 30日, □ : 90日)

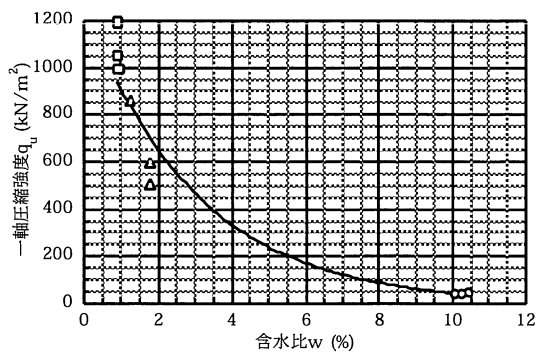


図-5 含水比と一軸圧縮強度の関係
(○ : 材令7日, △ : 30日, □ : 90日, 実線は指数関数による近似曲線)

により調査した。図-3は、アスファルト乳剤量およびベントナイト量を計画配合量との比でプロットしたもので、アスファルト乳剤量の変動幅が大きめであるが、おおよそ 0.8~1.2 の範囲にあり平均値はいずれも 1 を上回っている。この程度の変動幅は不可避のものとして配合設計を行っている。

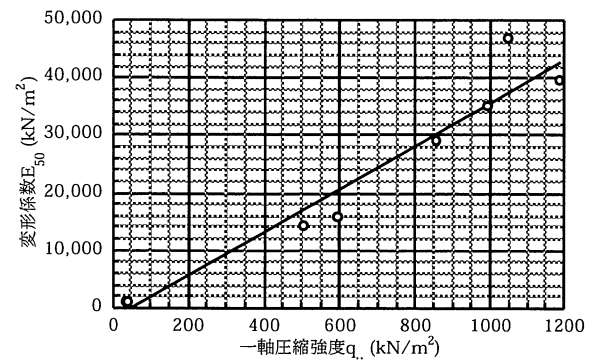


図-6 一軸圧縮強度と変形係数の関係
(実線は最小2乗法による回帰直線)

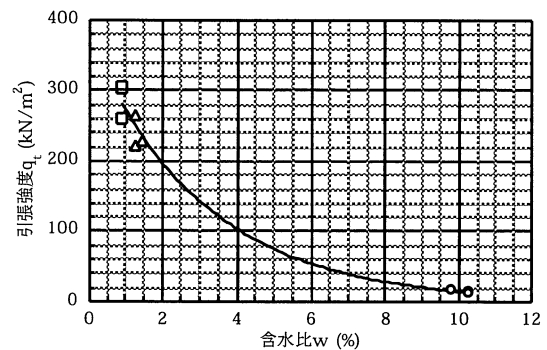


図-7 含水比と引張り強度の関係
(○ : 材令7日, △ : 30日, □ : 90日, 実線は指数関数による近似曲線)

(2) 要素試験

上述の材料把握試験を補完する目的で、室内で遮水材料を混練し、要素試験を実施した。吹付け時の状態を完全に再現することは難しいが、ここでは湿潤密度を吹付け時と一致するようにモールドに詰めて供試体を作成した。

a) 一軸圧縮強度

図-4は乾燥密度 ρ_d と一軸圧縮強度 q_u の関係で、材令ごとにみれば両者はほぼ比例関係にあるが、材令とともに急速に強度が増加していることが分かる。本材料の強度増加の原因は、セメント等の固化材を混合した場合と異なり、主にアスファルト乳剤の分解によるもので、分解の程度は含水比から推定できる。図-5は含水比 w と q_u の関係をプロットしたもので、含水比の低下とともに強度増加を呈することが分かる。

本吹付け材料の変形係数 E_{50} は、図-6より $E_{50} = 30 \sim 40 q_u$ 程度である。

b) 引張強度

図-7は含水比 w と割裂試験により求めた引張強度 q_t の関係で、一軸圧縮強度の場合と同様

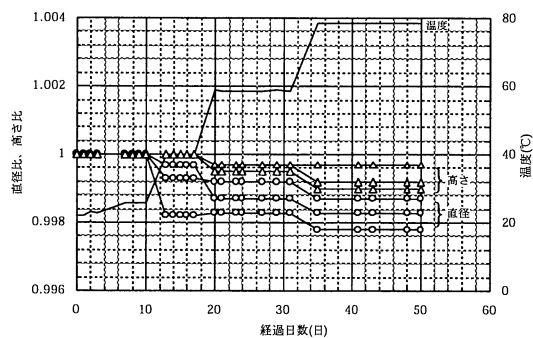


図-8 外気温による供試体寸法の変化

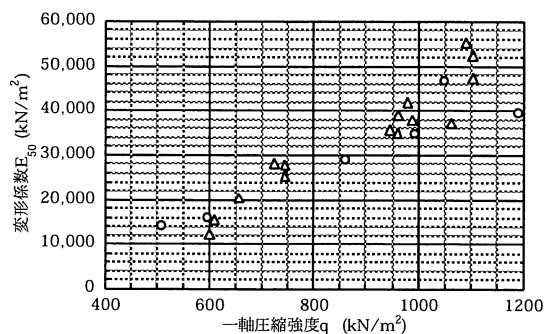


図-9 凍結融解後の強度特性
(○：凍結融解前，△：凍結融解後)

に、含水比の低下とともに引張強度が増加している。引張側の変形係数が圧縮側とほぼ同程度であると仮定すると、本吹付け材料の引張りによる破壊ひずみは0.7～1.5%程度と予想される。

c) 外気温の影響

廃棄物に含まれる有機物の自然分解等により遮水シート近傍の温度は60℃程度にまで上昇する場合もあると言われているため、温度上昇による物性変化を調査した。供試体を常温で30日養生した後、養生温度を20、40、60、80℃に変化させて約10日ずつおき、供試体寸法を測定した。直径は6点、高さは2点の測定を行い、それぞれの平均値を初期値の比としてプロットした結果が図-8である。図によれば、吹付け材料は温度上昇による膨張は示さず、逆に含水比低下に起因すると考えられる収縮を呈している。収縮率は最大で0.2%程度であり、この値は上述した破壊ひずみを下回っている。

d) 凍結融解の影響

例えば、北海道のような寒冷地で凍結が生じる地域での供用を想定し、凍結融解試験を行った。-20℃で5日間、常温で5日間を1サイクルとして1、2、5、10、15サイクルにおいて一軸圧縮強度試験を行った。図-9は q_u と E_{50} の関係をプロットしたもので、凍結融解前を○印、凍結後を△

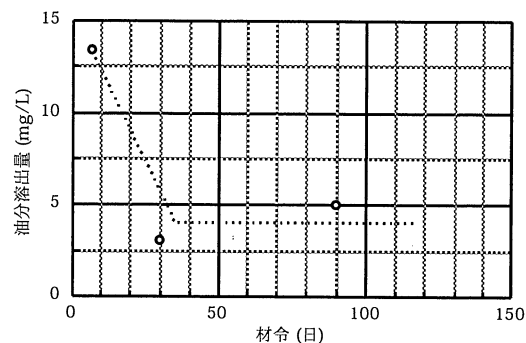




写真-1 遮水材吹付けプラント

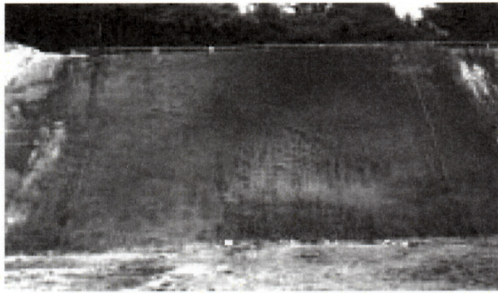


写真-2 遮水材吹付け後の全景
(九州地区 A 処分場)

表-3 透水係数の測定結果 (単位: $\times 10^{-7} \text{cm/s}$)

材令	測定値	平均
直後	1.6~15	7.6
1.5 月	0.038~0.91	0.41
4.5 月	0.031~0.62	0.25
7.5 月	0.026~0.58	0.28

表-4 一軸圧縮強度の測定結果 (単位: kN/m^2)

材令	測定値	平均
直後	46~128	85
1.5 月	139~228	175
4.5 月	160~356	245
7.5 月	116~288	178

したがうものと仮定すると, n 点の標本から平均値 m および標準偏差 s を求めれば, 法面全体の透水係数の平均値の常用対数 μ が $\log_{10}(1 \times 10^{-7}) = -7$ を下回る確率 P は式 (1) で与えられる.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1)$$

$$\mu \leq m + \xi \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

例えば, 材令 1.5 ヶ月に対しては, $n=4$, $\mu = -7$, $m = -7.653$, $s = 0.627$ を代入すれば $\xi = 2.063$ が得られ $P = 0.9804$ となる. このとき遮水層全体の透水係数の平均値は, 信頼度 98% で目標値を満足するといえる.

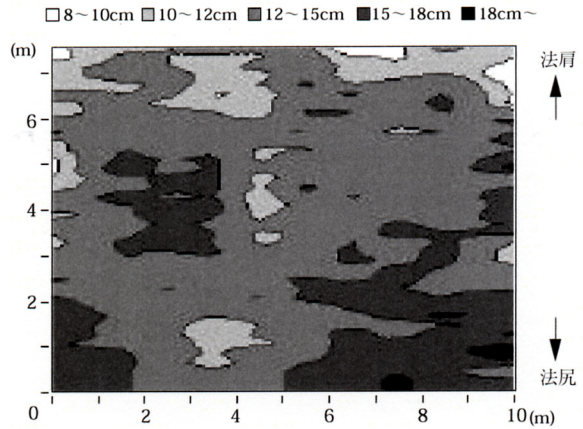


図-11 吹付け遮水材の層厚分布図

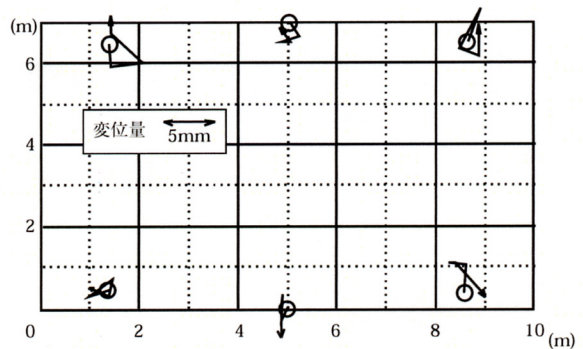


図-12 標点の測定結果 (○印は初期値. 標点の重心は不動であると仮定)

(2) 一軸圧縮強度

表-4 は一軸圧縮強度の測定結果で, いずれの材令でも目標値 50kN/m^2 を満足している.

(3) 層厚

図-11 は, 立体画像計測システム⁶⁾による遮水層厚の計測結果に基づいて作成したコンター図である. 層厚は全面において施工目標値 8cm を上回っていることを確認した.

(4) 伸縮

6 点の標点を設置し, 隣接する標点間の距離 11 箇所を敷設直後から 12 ヶ月経過まで経時的に測定した. 測定結果から最小 2 乗法により各標点の座標値を算定し, 伸縮の様子を示した結果が図-12 である. 変位量は伸張側, 収縮側ともに最大でも 3~4mm 程度で, 測点間の距離 3.0~3.6m に対し 0.1% で, この値は要素試験で得られていた値 (約 0.2%) と同程度である. なお, 敷設実験の実施場所は, 気候としては高温

多雨（4～10月の平均気温 25.3℃，11月～3月の平均気温 16.7℃，年平均降雨量 2,300mm）のため強い日照による乾燥と降雨による加湿を繰り返して受け，伸縮量の測定条件としてはかなり厳しいものといえる。

(5) 外 観

一年間の曝露中には梅雨期・台風期を中心として降雨を受けているが，これまでにガリ侵食の痕跡は全く確認されていない。これはアスファルト分が材料同士の粘結材として働き耐侵食性を発揮したためと考えられる。

5. 結 論

アスファルト乳剤，ベントナイト，砂，水から成る吹付け遮水材を開発し，要素試験および吹付け実験を通じ，その性能を確認した。その結果，以下のことが分かった。

- 1) 吹付け材料であるために配合の変動は不可避であるが，変動率は 0.8～1.2 程度であり，この変動を見込んだ上で配合設計を行えば，所定の目標強度，目標透水係数を満足させることが可能である。
- 2) 割裂試験結果によれば引張りによる破壊ひずみは 0.7～1.5%程度とみられる。室内で最大 80℃までの養生温度を上昇したときの引張りひずみは 0.2%，敷設実験で実測したひずみ量は 0.1%程度で，いずれも破壊ひずみに対して余裕がある。
- 3) 寒冷地での供用を想定して凍結融解試験を行ったが，今回の試験範囲では一軸圧縮強度や変形係数の低下はみられなかった。
- 4) 本吹付け材料から溶出する油分は材令とともに減少する。初期状態における溶出量が多少多めであるが，道路用アスファルト混合物とほぼ同程度である。

- 5) 1：1勾配の法面に対する敷設実証実験を実施し，透水係数，一軸圧縮強度，層厚が目標性能を満足することを確認した。
- 6) 降雨量が非常に多い地域において敷設実験を実施し 1 年間，曝露したが本吹付け材料は侵食等の劣化を生じなかった。

今後，本吹付け材が構造基準（基準省令）で示されている「アスファルト・コンクリート」と同等の性能を有することを示していくとともに，実工事への適用を目指していく。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，ライト工業株式会社，東亜道路工業株式会社，株式会社ホーゲン各位の御協力を賜った。また九州地区A処分場にて実施した敷設実証実験は環境事業団「次世代廃棄物処理技術基盤整備事業」による助成を受けたもので，委員各位より貴重な御意見を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 樋口雄一，押方利郎，白井直人，海老原正明，森雄治，西澤修一，有賀度，木間正夫，中野裕司，吉武美智男，古賀慎：アスファルト・ベントナイト混入遮水材の吹付け施工および品質評価，第 56 回土木学会年次学術講演会概要集 VII，pp. 44～45，2001。
- 2) 総理府，厚生省：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る技術上の基準を定める命令，1998.6.15
- 3) 押方利郎：廃棄物最終処分場再生システム，新政策，Vol.15，No.6，pp. 74 - 77，2000。
- 4) 樋口雄一，押方利郎，白井直人，森雄治：最終処分場の適正化および減容化による再生技術，第 4 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 285～290，2001。
- 5) 樋口雄一，白井直人，押方利郎，森雄治：廃棄物最終処分場再生システム実証実験，第 12 回廃棄物学会研究発表会講演論文集，Vol.2，pp. 1048～1050，2001。
- 6) 西澤修一：画像制御によるノンプリズム・レーザ一計測システム，測量，Vol.4，日本測量協会，2000。