

ベントナイトの特性と環境汚染防止分野への応用

Characteristics of Bentonite and Its Effective Application to Prevent the Environment from Contamination Impact

水野 克己 (みずの かつみ)
(株)豊順洋行 地球環境開発グループ 部長

近藤 三二 (こんどう みつじ)
(株)豊順洋行 顧問

1. ま え が き

不飽和状態のベントナイトは、多量の水を吸収してゼリー状となり水の移動を拘束する特異な性質がある。このため、古くから溜池や水田の漏水防止に利用されてきた。また、1960年代より開発に伴う汚染物質の地盤環境への長期的な影響が問題となり、難透水性土質材料に対する評価技術の研究がなされ、バリア材としてベントナイトを応用した各種ジオシンセティックスが開発され、その工法も探求されている。地盤環境への汚染物質の悪影響は、基本的に廃棄物から出る浸出水の地下水への移流、拡散等によってもたらされる。このためベントナイトをバリア要素として廃棄物を封じ込めて浸出水の移動を阻止することは、極めて合理的な考えである。本論文ではベントナイトの遮水材としての基本的な物理・化学的特性とその適用性について論述する。

2. ベントナイトの遮水材料としての応用事例

ベントナイトは、単独また異種材料と組合せて、一般の土と同じく気・液・固の相対的比率を工学的に制御することで環境汚染防止分野に利用されており、その応用事例は次の3種別に分類される。

2.1 ベントナイト泥水

水に分散したベントナイトはコロイドとなり、重い固体粒子を懸濁するとともに、静水圧下で地盤の多孔質表面にベントナイト薄片状粒子が定方位配向して、可塑性のベントナイトマッドケーキ、いわゆる難透水性泥膜を形成する。この性質を利用して鉱微粉末（例えば密度 $4.0\sim 5.0\text{ g/cm}^3$ ）を安定に懸濁させ、地盤よりも高密度のベントナイト重泥水（密度 $2.0\sim 2.5\text{ g/cm}^3$ ）を汚染地盤全周囲に充填する原位置封込め工法が開発された（口絵写真—8）。また、最終処分場におけるシート損傷検知修復システムの開発研究などがなされている¹⁾。

2.2 ジオシンセティッククレイライナー

ジオシンセティッククレイライナー（Geosynthetic Clay Liner）は最終処分場の浸出水漏水防止やガスバリアなどの遮水材として利用されている（口絵写真—9）。これらはベントナイトをジオテキスタイルで包接したタイプと、接着剤でジオメンブレンの片面に圧着したジオメンブレン支持型のタイプがある。いずれも工場で製造されロール状で供給される。ジオメンブレン支持型ジオ

シンセティッククレイライナーのベントナイト層によって得られる透水係数は 10^{-9} cm/s のオーダーである²⁾。

2.3 ベントナイト混合土

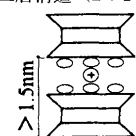
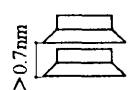




ベントナイト混合土（Geosynthetic Bentonite Soil）は、適度に水を含んだ現地発生土や購買土に、ベントナイトを透水係数にかかわる閾値（Threshold Value）を越えた量の配合を行ったものである。これは転圧重力式機械などを用いて締め固めることで最終処分場の粘土ライナーとして用いられている。さらにベントナイト混合土を用いた急斜面吹付け工法が開発された（口絵写真—10）、また施工管理の面から粘土ライナー（Compacted Clay Liner）の体系化が進んでいる^{3),4)}。

3. 遮水材としてのベントナイト特性

3.1 ベントナイトの環境汚染防止機能の源泉

ベントナイトは数千万年以前または以上の火山噴出物から生成した粘土鉱物モンモリロナイトを主成分とする粘土の名称である。その性質は大部分が含水珪酸アルミニウムであるモンモリロナイトに依存している。モンモリロナイトは薄片状の結晶癖を有し、単位結晶格子には不整が多く大きな負電荷を持っている。この負電荷を補償するために Na^+ や Ca^{++} のような陽イオンを単位結晶層間に吸着している。これが交換性陽イオンである。モンモリロナイトは表—1に示すとおり他の粘土鉱物、例えばカオリナイトに比べて極めて大きな比表面積と陽イオン交換容量を有する薄片状超微粒子である。ナトリウムイオンに富んだベントナイトでは、モンモリロナイト

表—1 モンモリロナイトとカオリナイトの基礎的な特徴¹⁾

モンモリロナイト	カオリナイト
三層構造（2：1型）	二層構造（1：1型）
	
幅 $d=0.1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 厚さ $t=2\sim 10\text{ nm}$ 比表面積 $=800\text{ m}^2/\text{g}$ 陽イオン交換容量 $=0.80\sim 1.15\text{ eq/kg}$	幅 $d=0.3\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ 厚さ $t=0.03\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 比表面積 $=10\sim 20\text{ m}^2/\text{g}$ 陽イオン交換容量 $=0.03\sim 1.15\text{ eq/kg}$
 ：珪酸四面体シート	 ：水分子
 ：アルミナ八面体シート	 ：交換性陽イオン

表—2 ペントナイトのコンシステンシー限界およびその他の一次性質

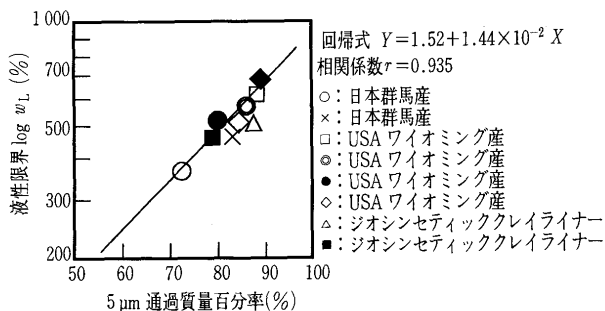
No.	記号, 試料名	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粘土分 5 μm 以下 (%)	陽イオン交換容量 (eq/kg)	pH	電気伝導率 (mS/m)
1	群馬産 Na 型ペントナイト	360	57	72.4	0.842	10.30	43.2
2	ワイオミング産 Na 型ペントナイト	616	48	88.0	0.723	9.83	47.0
3	ジオメンブレン支持型 GCL より採取	500	53	87.3	0.874	9.46	33.2

結晶層間の Na^+ が周囲の水と結合して水分子層を何重にも発達させ結晶層間を広げて、巨視的な体積膨張すなわちオスモチック膨潤を発現する。このように、モンモリロナイトと水との相互作用によって生成した複合体の水は自由水でなく、その移動は強く拘束される。この作用を水インピーダンス (Water Impedance) ともいう。これがペントナイトの遮水機能の源泉である⁵⁾。

3.2 ペントナイトの膨潤性とコンシステンシー

ペントナイトの遮水機能にかかわる特性は膨潤能であり、実用的になじみ深いコンシステンシー限界 (液性限界, 塑性限界, 塑性指数, 活性度) で知ることができる。これらがペントナイトの特性を示す重要な指標となる。

表—2 に鉱床産地の異なるペントナイトおよびジオシンセティッククレイライナーから採取したペントナイトのコンシステンシーとその他の一次性質を示す。また図—1 に液性限界と粘土分 (5 μm 通過質量百分率) の関係を示す。これらは良好な線形関係を示し、液性限界の大きさは粘土分の量に直接関係していることが判る⁶⁾。



図—1 液性限界と粘土分の関係

3.3 ペントナイトマッドケーキの透水性

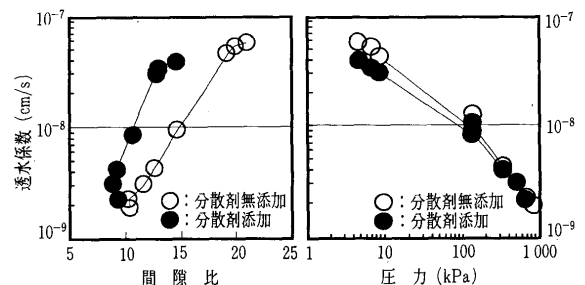
ペントナイトを水に分散 (6.0%) させたペントナイト泥水と、それにアニオン系分散剤 (0.4%) を添加した 2 種類のペントナイト泥水を定圧ろ過 (米国石油協会規格 13A) にて生成したペントナイトマッドケーキの透水係数を求めた。透水係数と間隙比, 透水係数と圧力の関係を図—2 に, 間隙比と圧力の関係を図—3 に示す。この実験で用いたペントナイトマッドケーキのコンシステンシー限界を表—3 に示す。

図—2 から, 同一間隙比においてアニオン系分散剤を添加したペントナイトマッドケーキは, 透水係数が大きくなる。しかし同一圧力下においては, アニオン系分散剤を添加したほうがわずかに透水係数が小さくなる。図—3 から, アニオン系分散剤を添加することにより, 圧力の増加に伴う間隙比の減少が 345 kPa 以上で一定になる。

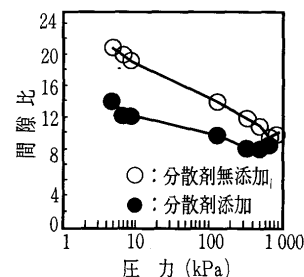
ペントナイトマッドケーキの相構造モデルを図—4 に示す。ペントナイトマッドケーキの間隙水は結晶層間膨潤に寄与している水と, その集合構造群 (粒子ドメイン) 間隙を満たしている水から成り, 後者の水の流れは直接透水係数に寄与する。同一間隙比で形成されるマッドケーキの相構造では, 分散剤の添加により拘束されていない水相が増加することで透水係数が上がり, 同一圧力で形成されるマッドケーキの相構造では, 分散剤の添加により粒子ドメイン間を満たしている水が減少して透水係数が下がる。分散剤の添加により, ペントナイト粒子の配向性が良好となることで間隙比が小さくなり, 透水係

表—3 ペントナイトマッドのコンシステンシー限界

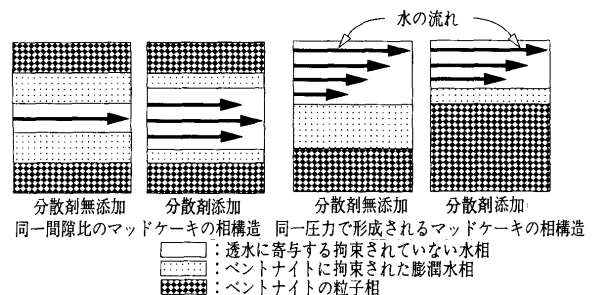
項目	液性限界	塑性限界	塑性指数
ペントナイト	617.2%	48.9%	68.3%
ペントナイト+分散剤	553.2%	34.2%	519.0%



図—2 ペントナイトマッドケーキの透水係数と間隙比, 透水係数と圧力の関係



図—3 ペントナイトマッドケーキの間隙比と圧力の関係



図—4 ペントナイトマッドケーキ相構造のモデル

数が小さくなると考えられる⁷⁾。

3.4 ジオシンセティッククレイライナーの透水性と自己修復法

ASTM D 5084 に準じた透水試験装置を用いて、飽和状態でジオメンブレン支持型ジオシンセティッククレイライナーの側面を拘束して載荷と除荷を与え繰り返したとき、上載荷に応じる供試体（ベントナイト層）の膨張および圧密に応じる鉛直変位経過を図-5に示す⁸⁾。

ベントナイト層の吸水膨張（膨潤体積）の程度は上載荷と平衡関係にあり、上載荷のスイッチングによって吸水と排水を繰返し、一種の呼吸のような現象を呈している。また、最初の膨張変位を除いて、先に受けた載荷履歴と関係なく除荷によって一定の膨潤状態に復元することが判る。これは上載荷の増大とともにベントナイト団粒の二次構造の再配列を生じて、より緻密な組織構造を形成していると考えられている⁸⁾。

表-4に、ジオメンブレン支持型ジオシンセティッククレイライナーに穿孔が生じた場合の透水性を示す。穿孔が生じた膨潤ベントナイト層は、より高い動水勾配によって圧縮されると透水係数が小さくなることが判る。穿孔部は載荷圧力とベントナイト層自身の膨潤圧によって膨潤し、ベントナイト層が可塑変形して穿孔部が充填、閉塞し自己修復性を発揮すると考えられる⁹⁾。本実験における自己修復性のモデルを図-6に示す。

3.5 ベントナイト混合土の浸透・収着性と透水性

(1) 浸透・収着性（汙過・吸着）

静岡産山土に対して乾燥重量比でベントナイト13%

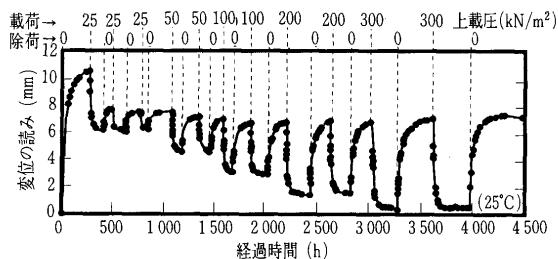


図-5 上載圧に応じる供試体の膨張および圧密変位経過

表-4 ジオメンブレン支持型ジオシンセティッククレイライナーにおける穿孔の効果

穿孔数 (個)	穿孔直径 (mm)	透水係数 (10^{-10} cm/s)	動水勾配
25	5.0	15.90	78
		3.65	1 760
		1.94	4 200
		1.09	7 540
7	10.0	41.90	85
		3.55	1 900
		1.65	4 500
		0.62	8 100
1	25.0	17.30	69
		2.91	1 510
		1.26	3 970
		0.83	6 830

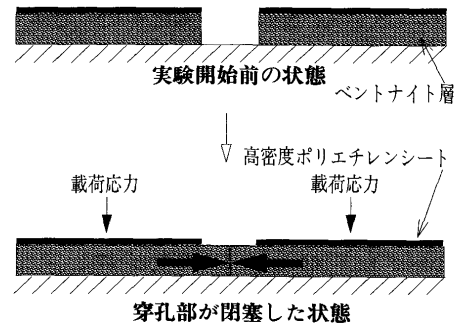


図-6 ジオシンセティッククレイライナー自己修復性モデル

配合時の物性値を表-5に、これを用いて最終処分場から採取された浸出水で三軸装置による透水試験を行い、100日後に浸透した浸出水の性状を表-6に示す。また、この透水試験に用いたベントナイトの水分抽出液によるイオン分析結果を表-7示す。

電解質を含む浸出水が浸透することでベントナイト混合土の液性限界は131.0%から54.8%に、塑性限界は18.5%から15.0%に減少した。しかし、ベントナイト混合土は難透水性を維持したまま、浸透した浸出水は濁度や電気伝導度が低下し微粒子が捕捉され、電解質が収着されることが表-6より判る。0.7 (eq/kg) 以上の大きな陽イオン交換容量で表される高い電荷密度と800 m²/g というモンモリロナイトの大表面積により、無機・有機汚染物質の浸透・収着（汙過・吸着）するという減衰層としての機能が発揮されることが考えられる。

(2) 透水性

近年、最終処分場において、施工中における最適含水

表-5 ベントナイト混合土（13%配合）の物性

項目	試験結果	試験方法出典
礫分 (%)	3.7	JIS A 1204
砂分 (%)	63.4	JIS A 1204
シルト分 (%)	14.5	JIS A 1204
粘土分 (%)	18.4	JIS A 1204
最大粒径 (mm)	9.5	JIS A 1204
土粒子の密度 (ρ_s) (g/cm ³)	2.64	JIS A 1202
自然含水比 w (%)	13.6	JIS A 1203
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.645	JIS A 1210
最適含水比 w_{opt} (%)	16.3	JIS A 1210
三軸 UU	c_u (kN/m ²)	47.0 JGS T 521
	ϕ_u (度)	25.8 JGS T 521

表-6 浸透前後の最終処分場浸出水の性状変化

項目	浸透前	浸透後	試験方法
濁度 (度)	18.6	1.7	JIS K0202 9.4
塩素イオン (mg/l)	4 500.0	2 200.0	JIS K0102 35.1
電気伝導度 (mS/m)	730.0	7.6	JIS K0102 13
pH	8.4	8.1	JIS K0102 12

ベントナイト混合土は最大乾燥密度に対して締固め度90%の条件下、この時の透水係数は、 $k=6.1 \times 10^{-8}$ cm/s、飽和度は100%

表-7 ベントナイト水分散抽出液イオン分析結果

イオン種	mg/l	試 験 方 法
ナトリウム	1 800	原子吸光法
アンモニウム	92	ノンドフェノール青吸着光度法
カリウム	25	原子吸光法
マグネシウム	98	ICP 発光分析法
カルシウム	64	ICP 発光分析法
ふっ素	16	イオンクロマトグラフ法
塩素	420	イオンクロマトグラフ法
硝酸	150	イオンクロマトグラフ法
りん酸	10未満	ICP 発光分析法
硫酸	2 500	イオンクロマトグラフ法

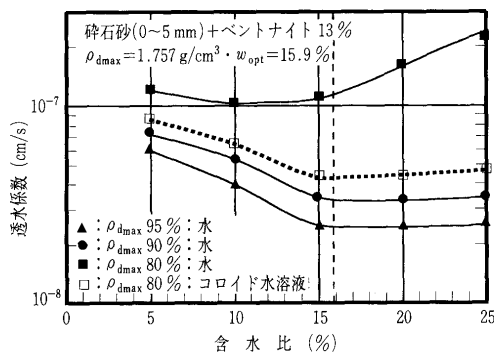


図-7 ベントナイト混合土の締固め度と含水比と透水係数の関係

比以下による転圧と、蒸発による乾燥や初期盛土の有効応力不足が原因で、粘土ライナーの透水係数が得られないことが報告されている¹⁰⁾。

微粒砕石を含んだ砕石砂の乾燥重量比でベントナイトを13%添加し、水道水を用いて締固め度と含水比を変えたときの透水係数の関係と、80%締固め度においてモンモリロナイト・コロイド水溶液（3%）を用いてJIA A 1218に準拠し透水試験を行った結果を図-7に示す。

最適含水比以下の低含水比域では、密度が小さく間隙比が大きいため透水係数は大きくなるが、最適含水比付近では、密度が増加し間隙比が小さくなるため透水係数は最小となる。また、この点を越えて高含水比域になると土粒子間隙内に含まれる拘束されない自由水が多くなり透水係数は大きくなる。そして、この土粒子間隙内に存在している自由水をモンモリロナイト・コロイド水溶液で置き換えることで、土粒子間隙内に連続したモンモリロナイト・コロイド層が形成されて透水係数が低下する。

したがって、締固め度不足や含水比低下が原因で透水係数が得られない場合、また前記2.1に述べた遮水シー

ト復旧効果に加えて第一暴露効果（First Exposure Effect）の溶液としてモンモリロナイト・コロイド水溶液の採用が効果的であることが判る¹⁰⁾。

4. ま と め

ベントナイトは、その主成分鉱物であるモンモリロナイトの大表面積、高い陽イオン交換容量と陽イオン種、薄片状結晶からなる超微粒子性などの特性が、水との相互作用によって拘束された場合において相乗効果的に作用し合って実質的に難透水性ならびに汚染物質に対する浸透・収着性（汙過・吸着）を発現する。

モンモリロナイトは安定な天然の無機物質であり、その水との化学的な親和力に基づくベントナイトの環境汚染防止機能は効果的なものであり、今後さらにその有効利用が期待されると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 水野克己・古賀 慎・本郷隆夫・村上譲二・市川隆文・川口光雄・大塚義一・竹本光慶・鎌野治樹・成島誠一・佐藤文俊・中村隆浩・小國拓也：最終処分場における自然加圧修復システムの開発（室内修復実験・実規模修復実験），第3回環境地盤工学シンポジウム講演集，地盤工学会，pp. 67～72, 1999.
- 2) 古賀 慎・成島誠一・水野克己・高橋 聡：廃棄物最終処分場におけるジオシンセティッククレイライナーによる工事例，第9回廃棄物学会研究発表会講演集，pp. 864～866, 1998.
- 3) 西山勝栄・吉村丈晴・波多江勝・濱田尚人・堀江直樹・飯塚孝之・水野克己・徳島博道：吹き付けによるベントナイト混合土遮水性性能評価，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2547～2548, 2000.
- 4) 水野克己・中嶋 洋・本郷隆夫：ベントナイト混合土を使用した複合しゃ水工構造のしゃ水性評価検討，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2231～2232, 1999.
- 5) 近藤三二：スメクタイトの膨潤と透水性，スメクタイト研究会会報，Vol. 5, No. 2, pp. 21～27, 1995.
- 6) 高橋 聡・嘉門雅史・近藤三二：ベントナイトのコンシステンシー限界，土のコンシステンシーに関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 103～106, 1995.
- 7) 皆瀬 慎・近藤三二・嘉門雅史：ベントナイトマッドケーキの透水性の評価，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp. 171～172, 2000.
- 8) 近藤三二・嘉門雅史：天然バリアの吸水膨張特性と透水性の評価，第29回土質工学研究発表会講演集，pp. 117～120, 1994.
- 9) 高橋 聡・近藤三二・嘉門雅史：ジオメンブレン支持型GCLの破損部位における透水性の評価，国際ジオシンセティック学会日本支部，ジオシンセティック論文集，第14巻，pp. 350～359, 1999.
- 10) 藤原照幸・水野克己・本郷隆夫：微粒砕石を含んだ砕石砂を用いたベントナイト混合土のしゃ水性評価検討，第35回地盤工学研究発表会講演集，pp. 167～168, 2000.

（原稿受理 2000.10.2）