

土粒子内の空隙を考慮したベントナイト混合土の 配合設計法に関する研究

Study on the Design Method of Bentonite Mixture Soil Liner Considering Swelling of Bentonite-Sand Mixture and Particle Pore

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI
黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

ベントナイト混合土の合理的な配合設計を行うことを目的として、ベントナイトの膨潤と土粒子内の空隙を考慮した修正マクロ空隙比に基づくベントナイトの配合添加率決定法を提案した。本研究では、5種類の土質材料を母材として用い、ベントナイト混合土に関して締固め試験および透水試験を行った。推定限界添加率は透水試験から求められる実験限界添加率とほぼ等しく、提案した配合設計法の妥当性が検証された。

キーワード：ベントナイト混合土、透水試験、空隙比、膨潤

A design method to determine the critical ratio for bentonite addition based on the revised macro void ratio that considers the swelling property of bentonite and particle pores of lightweight soil was proposed. The compaction tests and permeability tests were carried out on 5 kinds of soils varying the ratio of bentonite-sand mixture. The estimated critical ratio of bentonite addition was in good agreement with the measured critical ratio of bentonite by the permeability tests. It was confirmed that the proposed design method was applicable to the various soils.

Key Words: Bentonite Mixture Soil Liner, Permeability Test, Void Ratio, Swelling of Water Absorption

1. はじめに

近年、廃棄物最終処分場では、浸出水による地下水汚染防止を目的として、遮水シートとベントナイト混合土による複合遮水構造を用いる事例が増加している。著者らは、このベントナイト混合土を用いた遮水工を開発し“ソイルレイヤー工法”と名づけ、いくつかの処分場へ適用した¹⁾。このベントナイト混合土による遮水層には、透水係数が 10^{-6} cm/sec以下という性能が必要とされる²⁾。これを満足するためのベントナイト添加率は、母材の乾燥質量に対して10~15%程度^{3)~5)}とされているが、実際の配合設計は配合率を3種類以上に变えて締固め試験や透水試験を実施して行われている。しかし、この設計配合率決定手法では、供試体個数も多く、長時間を要するという問題がある。

このようなことから、簡便で合理的な配合設計法に関する検討が行われてきた。飯島ら⁶⁾は、珪砂、まさ土および礫混じり細粒材等を母材に用いたベントナイト混合土の透水試験を実施し、塑性指数と透水係数との間に

相関関係があることを示し、この関係を用いた簡易な配合設計法を提案している。小峯⁷⁾は、ベントナイト系遮水材中のモンモリロナイトの膨潤挙動を評価できるパラメータ「モンモリロナイト膨潤体積ひずみ ϵ_{SV3} 」と透水係数の相関関係を求め、このパラメータを用いた配合設計法を提案している。

一方、著者らはベントナイトの膨潤を考慮したマクロ空隙比の概念を用いた合理的な配合設計法を提案してきた^{8),9)}。すなわち、ベントナイト添加率(=母材の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率)の増加に伴い透水係数が低下するが、ある添加率から透水係数の低下の割合が小さくなることを実験で示し、これをベントナイトの実験限界添加率と定義した。そして、この実験限界添加率を推定するため、ベントナイトの膨潤を考慮したマクロ空隙比の概念を提案し、この値がゼロになる添加率が推定限界添加率であるとした。このマクロ空隙比は、ベントナイト混合土の締固め試験結果から評価できるため、長期間を要する透水試験を数多く実施することなく推定限界添加率を決定することができる。

そして、この推定限界添加率を配合設計におけるベントナイト添加率とすることにより、合理的な配合設計が可能となる。ただし、推定限界添加率でのベントナイト混合土の透水性が、基準値を満足するかを確認するための透水試験は必要となる。

しかし、しらすのような多孔質な土質材料をベントナイト混合土の母材として用いた場合、マクロ間隙比に基づき得られた推定限界添加率は、透水試験の結果から得られた実験限界添加率より大幅に大きくなった。そこで、この原因を、多孔質な土の土粒子内部にはベントナイトが膨潤しても満たすことができない微細な間隙が存在するためと考え、表面乾燥飽和状態における含水比から評価した微細空隙率 γ を取り入れた修正マクロ間隙比の計算式を提案した^{10),11)}。

本研究では、緑色凝灰質砂岩破砕砂、黄色凝灰質砂岩破砕砂、しらす A、しらす B および山砂の微細空隙率 γ を評価し、これらを母材としたベントナイト混合土のベントナイト添加率を変化させた締固め試験および透水試験を実施して締固め特性と透水特性について検討した。そして、提案した修正マクロ間隙比を用いた配合設計法が、これらの微細空隙率の異なる母材を用いたベントナイト混合土へ適用可能であるかを検討した。

2. ベントナイト混合土の膨潤特性と遮水性能に関する既往の研究

ベントナイトは、数百万年～約2億年前の火山噴火による火山灰を起源とする堆積物が永年の地球化学的変質作用を受けて生成した天然の粘土であり、粘土鉱物のうちモンモリロナイトを主成分としている。モンモリロナイトは一種の珪酸塩鉱物であり、Si, O, Al および OH 等が主要な構成原子ならびにイオンとなっており、これに Na, K, Ca, Mg や水分子が加わって薄い層状骨格を形成している。Na イオンに富んだナトリウム型モンモリロナイトは、Ca, Mg イオンに富むカルシウム型モンモリロナイトよりも水分子を取り込む量が多く、そのために膨潤し、かつ分散しやすくなる性質がある。したがって、廃棄物最終処分場の遮水工には、ナトリウム型ベントナイトが使用されることが多い。なお、カルシウム型ベントナイトに炭酸ソーダ (Na_2CO_3) 等を加え、カルシウムイオンをナトリウムイオンに置き換えたのちベントナイト混合土に使用する場合もある¹²⁾。

このようなベントナイトの膨潤特性とそれが透水係数に与える影響を明らかにするために、小峯ら¹³⁾は、試料周辺の温度と水蒸気圧が制御できる走査型電子顕微鏡を用いて、砂・ベントナイト混合材料中の膨潤挙動を

観察している。その結果、ベントナイト配合率 (=母材の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量の百分率) 5%および 10%の供試体では、吸水によるベントナイトの体積膨張は、砂粒子骨格が形成する間隙を十分に充填するまでに至らず、加水後も混合土内には間隙が存在していることを示している。一方、ベントナイト配合率が 20%以上では、吸水による体積膨張により砂粒子骨格の形成する間隙がほぼ完全に充填されており、水みちになり得る間隙は認められなかったことも併せて示している。さらに、小峯⁷⁾は、砂・ベントナイト混合材料の透水試験を実施して透水係数とベントナイト配合率との関係を明らかにし、配合率の増加に伴って透水係数が低下すること、およびベントナイト配合率 20%以上の場合、その値は 10^{-9}cm/sec 以下と非常に小さくなることを示している。また、この透水係数の低下傾向の変化が、ベントナイト配合率 5%および 10%では大きく、ベントナイト配合率 20%以上の場合には小さくなることを示している。これらは、ベントナイト配合率 5%および 10%では、配合率の増加により砂粒子骨格が形成する間隙の充填程度が大きく変化するためであり、ベントナイト配合率 20%以上では、ベントナイトの膨潤変形により供試体中の砂粒子骨格が形成する間隙がほぼ完全に充填されるためと考察している。

Filippo ら¹⁴⁾や緒方ら¹⁵⁾は、混合する砂の粒度分布を変えたベントナイト系材料の透水試験を実施し、ベントナイト配合率が 0～15%程度の混合材料では、砂の粒度特性が透水係数に与える影響が大きく、ベントナイト配合率が 20%以上になるとその影響が小さくなることを示している。

以上の研究成果から、廃棄物最終処分場の遮水層にベントナイト混合土を用いる場合、ベントナイト配合率を 20%程度に設定すれば、母材の粒度特性にあまり依存せずに 10^{-9}cm/sec 以下の透水係数が得られるものと推測される。しかしながら、前述したように、廃棄物最終処分場における遮水層の透水係数の基準値は 10^{-6}cm/sec 以下であり、経済性の観点からも、合理的なベントナイト添加率を決定することが重要であると考えられる。

3. 微細空隙率^{10),11)}の定義と試料の物性値

(1) 微細空隙率の定義

図-1 に、表面乾燥飽和状態における示相図を示す。図において、ベントナイトが膨潤しても埋めることのできない、かつ通水を許さない土粒子内の微細な間隙の体積を γV_s とし、 γ を微細空隙率と定義する。ここで、細骨材の吸水率試験における表面乾燥飽和状態において

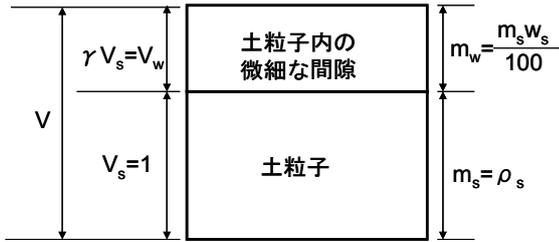


図-1 表面乾燥飽和状態の土粒子の示相図

表-1 試料の物性値

試料	土粒子の密度 ρ_s g/cm ³	微細空隙率 γ %	礫分 %	砂分 %	細粒分 %	均等係数 U_c	曲率係数 U'_c
①緑色凝灰質砂岩砕石	2.336	1.180	35.2	44.5	20.3	59.1	0.591
②黄色凝灰質砂岩砕石	2.716	0.200	12.2	82.2	5.6	5.8	1.586
③しらすA	2.484	0.347	22.7	53.2	24.1	66.7	3.010
④しらすB	2.443	0.391	31.4	63.6	5.0	9.3	2.990
⑤山砂	2.667	0.061	76.7	19.9	3.4	7.9	3.042

表-2 試料の締固め特性値

試料	最大乾燥密度 最適含水比	
	ρ_{dmax} g/cm ³	W_{opt} %
①緑色凝灰質砂岩砕石	0.864	68.0
②黄色凝灰質砂岩砕石	1.688	18.5
③しらすA	1.271	24.2
④しらすB	1.275	30.9
⑤山砂	2.03	10.4

表-3 ベントナイトの物性値

項目	記号	単位	ベントナイト	
			A	B
産地			米国	米国
密度	ρ_b	g/cm ³	2.86	2.5
膨潤比			5.84	6.57
液性限界	w_l	%	581	616
塑性限界	w_p	%	38	48
塑性指数	I_p		543	568

は、この土粒子内の微細な空隙に水分が存在すると考えると、このときの含水比 $w_s (=m_w/m_s \times 100)(\%)$ と γ の関係は式(1)となる。

$$\gamma = \frac{\rho_s w_s}{100 \rho_w} \quad (1)$$

ここに、

ρ_s : 土粒子密度(g/cm³)

ρ_w : 水の密度(g/cm³)

(2) 試料の物性値

ベントナイト混合土の母材には、緑色凝灰質砂岩破砕砂、黄色凝灰質砂岩破砕砂、しらす A、しらす B お

よび山砂を用いた。緑色凝灰質砂岩破砕砂および黄色凝灰質砂岩破砕砂とは、栃木県那珂川流域に分布する凝灰質砂岩を破砕したものである。しらす A は、青森県十和田市指久保地方で採取したものであり、しらす B は宮崎県宮崎市から採取したものである。山砂は、栃木県内で採取したものである。表-1 および表-2 に、これらの物性値および締固め特性値を示す。なお、締固め試験は JIS A 1204 に基づき非繰返し法(A-c 法)によって行った。

緑色凝灰質砂岩破砕砂は、土粒子密度と最大乾燥密度が最も低く、微細空隙率が最も高い多孔質な土質材料である。黄色凝灰質砂岩破砕砂は、土粒子密度は最も高いが、微細空隙率は山砂より大きく、山砂と比較して多孔質な性質である。しらす A およびしらす B は、土粒子密度、微細空隙率および最大乾燥密度は同程度であり、5 種類の母材の中で中間的な値を示している。山砂は、最大乾燥密度が最大で、微細空隙率が小さく多孔質でないことが分かる。

表-3 に、実験に用いた 2 種類のベントナイトの特性を示す。これらはともに米国産の Na 型であるが、密度はベントナイト A のほうが高く、膨潤比はベントナイト B のほうが大きい。

ここで、ベントナイト膨潤比 β は、50g の乾燥ベントナイトを密度が 0.637g/cm³ になるように締固め、後述するたわみ性壁透水試験における拘束圧である 402kPa の水圧のもとで一次元膨潤させたときの厚さ比である。

なお、本研究におけるベントナイト混合土の母材とベントナイトとの組合せは、山砂のみベントナイト B を使用し、他の試料にはベントナイト A を使用した。

4. ベントナイト混合土の特性

(1) 締固め特性

JIS A 1204 に基づき非繰返し法(A-c 法)にて実施した母材単体およびベントナイト混合土の締固め試験結果を図-2～図-6 に示す。

黄色凝灰質砂岩破砕砂、しらす A、しらす B および山砂はベントナイト添加率の増加により、最大乾燥密度が低下する傾向にある。この原因は、ベントナイト混合土の締固めは母材とベントナイトを混ぜ、加水してから一時間おいた後実施しているが、この間にベントナイトが膨潤したためであると考えられる。

一方、緑色凝灰質砂岩破砕砂は、ベントナイト添加率の増加に対して最大乾燥密度が増加する傾向にある。これは、緑色凝灰質砂岩破砕砂は土粒子密度と単体での最大乾燥密度が最も低いことから、ベントナイトの添加

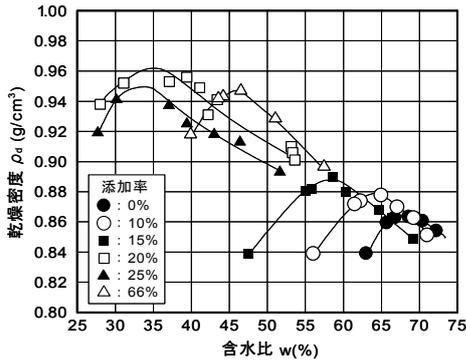


図-2 ① 緑色凝灰質砂岩破碎砂の締固め特性

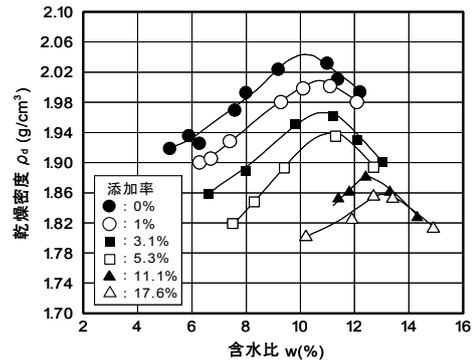


図-6 ⑤ 山砂の締固め特性

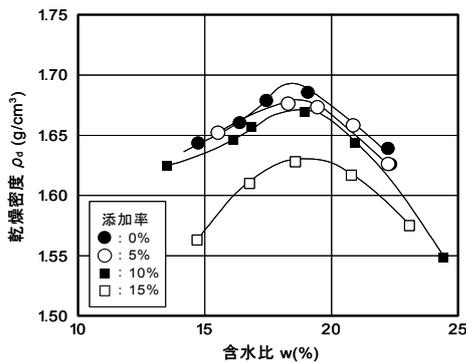


図-3 ② 黄色凝灰質砂岩破碎砂の締固め特性



写真-1 たわみ性壁透水試験装置

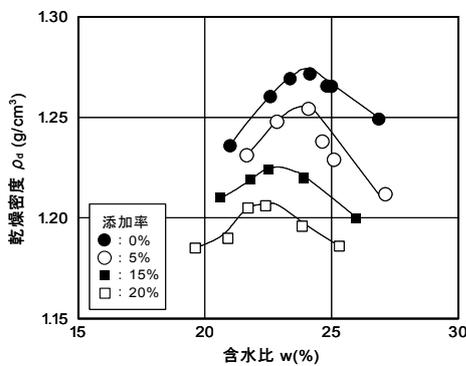


図-4 ③ しらす A の締固め特性

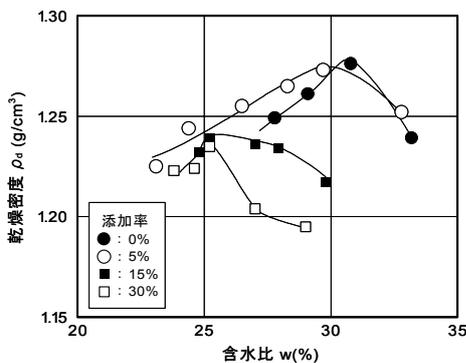


図-5 ④ しらす B の締固め特性

により土粒子のかみ合わせが改善されたためであると考えられる。また、最適含水比がベントナイト添加率の増加に対して低下する傾向にある。特に、ベントナイト添加率 20%と 25%の場合、他の添加率に比べ最適含水比が小さくなっている。これは試料を採取してからかなり時間が経過してからこれらの締固め試験を実施したため、多孔質な緑色凝灰質砂岩破碎砂の土粒子内の水分が蒸発したことが原因であると推察される。

(2) 透水特性

透水試験は、写真-1 に示すたわみ性壁透水試験装置を用いて ASTM D5084¹⁶⁾に準拠して実施した。供試体は、各ベントナイト添加率における最適含水比 w_{opt} で締固めて作製した。供試体寸法は、直径 10cm、高さ 12.7cm である。

試験手順は次のとおりである。まず、セル内に供試体を設置し、供試体内の空隙を二酸化炭素で置換した。そして、側圧 $\sigma_c=0.402\text{MPa}$ 、流入圧 $\sigma_{in}=0.392\text{MPa}$ 、流出圧 $\sigma_{out}=0.367\text{MPa}$ を負荷した状態で通水を行った。一定時間通水後、流入量と流出量がほぼ一定であること、および B 値が 0.95 以上であることを確認して飽和状態とみなし、その後、透水試験を開始した。試験における動水勾配は $i=20$ である。

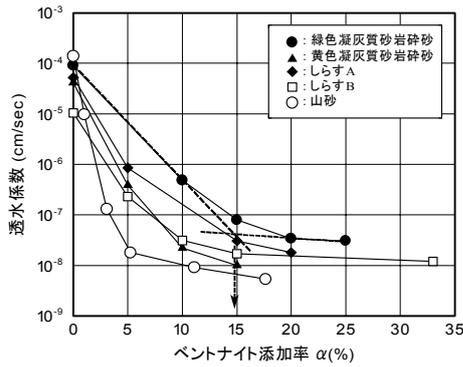


図-7 ベントナイト添加率と透水係数の関係

図-7 に、各母材の透水係数とベントナイト添加率の関係を示す。山砂では、ベントナイト添加率 5%で透水係数が 10^{-8} cm/s オーダーとなるのに対し、最も多孔質な緑色凝灰質砂岩破砕砂では、ベントナイト添加率 15%で 10^{-8} cm/s オーダーとなっている。

ここで、本研究では、実験限界添加率を図-7 の破線のように、添加率 0%の点とその次の点を結んだ直線、および添加率が最大の点とその前の点を結んだ直線の交点に対応する添加率として求めた。それぞれの実験限界添加率は、緑色凝灰質砂岩破砕砂で 15%、黄色凝灰質砂岩破砕砂で 8%、しらす A で 12%、しらす B で 8%、山砂で 4%であった。

5. 推定限界添加率と実験限界添加率

ベントナイトの膨潤のみを考慮したマクロ間隙比^{8),9)}は式(2)で、ベントナイトの膨潤と土粒子内の空隙を考慮した修正マクロ間隙比^{10),11)}は式(3)で与えられる。

$$e_m = \rho_s \left(\frac{1 + \alpha/100}{\rho_{d\max\alpha}} - \frac{\alpha/100 \cdot \beta}{\rho_b} \right) - 1 \quad (2)$$

$$e_m' = \rho_s \left(\frac{1 + \alpha/100}{\rho_{d\max\alpha}} - \frac{\alpha/100 \cdot \beta}{\rho_b} \right) - (1 + \gamma/100) \quad (3)$$

ここに、

α : ベントナイト添加率(%)

β : ベントナイト膨潤比

ρ_s : 土粒子密度(g/cm^3)

ρ_b : ベントナイトの密度(g/cm^3)

$\rho_{d\max\alpha}$: α (%)におけるベントナイト混合土の最大乾燥密度(g/cm^3)

γ : 微細空隙率(%)

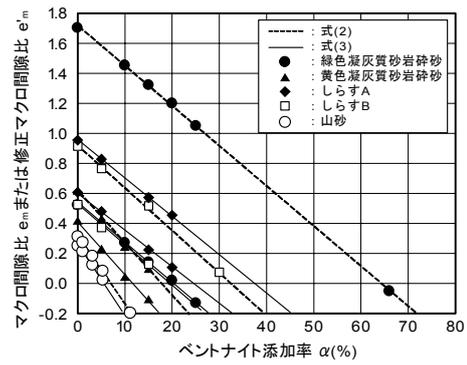


図-8 ベントナイト添加率とマクロ間隙比または修正マクロ間隙比の関係

表-4 実験限界添加率と推定限界添加率

母材	実験限界添加率 %	推定限界添加率	
		式(2) %	式(3) %
緑色凝灰質砂岩破砕砂	15	64	20
黄色凝灰質砂岩破砕砂	8	17	12
しらすA	12	38	24
しらすB	8	33	18
山砂	4	7	6

式(2)および式(3)から計算したマクロ間隙比または修正マクロ間隙比とベントナイト添加率の関係を図-8 に示す。また、これらの式から求めたマクロ間隙比または修正マクロ間隙比が 0 になる点、すなわち推定限界添加率と、図-7 に示した透水係数とベントナイト添加率の関係から求められた実験限界添加率を表-4 に示す。

いずれの母材においても、推定限界添加率は式(2)よりも式(3)の値のほうが実験限界添加率に近い値となっている。特に、最も多孔質な緑色凝灰質砂岩破砕砂では、式(3)により算出された推定限界添加率が式(2)のそれよりも約 44%小さくなっているのに対し、山砂ではその違いが 1%程度である。このことから、推定限界添加率の算定には、ベントナイトの膨潤のみならず土粒子内の空隙も考慮することが重要であると考えられる。

以上のことから、ベントナイトの膨潤のみを考慮した式(2)よりも、ベントナイトの膨潤と土粒子内の空隙を考慮した式(3)のほうが的確な推定限界添加率を求めることが可能であることが分かった。さらに、式(3)は、土粒子内の空隙が小さな砂や、凝灰質砂岩破砕砂等の多孔質な土質材料にも適用可能であると考えられる。

6. おわりに

微細空隙率の異なる 5 つの土質材料を母材としたベントナイト混合土のベントナイト添加率を変化させた締固

め試験および透水試験を実施し、その締固め特性や透水特性について検討した。さらに、修正マクロ間隙比を用いた配合設計法が、微細空隙率の異なる母材を用いたベントナイト混合土へ適用可能であるかを検討した。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 微細空隙率が最大なのは緑色凝灰質砂岩破砕砂で、その値は 1.180%であった。一方、山砂の微細空隙率は最小で、その値は 0.061%であった。
- ② 黄色凝灰質砂岩破砕砂、しらす A、しらす B および山砂はベントナイト添加率の増加により、最大乾燥密度が低下する傾向にあった。
- ③ 緑色凝灰質砂岩破砕砂の最大乾燥密度は、ベントナイト添加率の増大に伴って増加した。
- ④ 山砂では、ベントナイト添加率 5%で透水係数が 10^{-8}cm/s オーダーとなるのに対し、最も多孔質な緑色凝灰質砂岩破砕砂では、ベントナイト添加率 15%で 10^{-8}cm/s オーダーとなった。
- ⑤ 実験限界添加率は、緑色凝灰質砂岩破砕砂で 15%、黄色凝灰質砂岩破砕砂で 8%、しらす A で 12%、しらす B で 8%、山砂で 4%であった。
- ⑥ ベントナイトの膨潤のみを考慮したマクロ間隙比の式よりも、ベントナイトの膨潤と土粒子内の空隙を考慮した修正マクロ間隙比の式のほうが的確な推定限界添加率を求めることが可能であることが分かった。
- ⑦ 修正マクロ間隙比の式は、土粒子内の空隙が小さな砂や、凝灰質砂岩破砕砂等の多孔質な土質材料にも適用可能であると考えられた。

謝辞：本研究は、宇都宮大学との共同研究として実施したものです。ご指導戴いた宇都宮大学今泉繁良教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 戸村豪治, 中田雅夫, 喜多治之, 黒島一郎: 最終処分場におけるベントナイト混合土の品質保証技術に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告, pp.71-81, 2005.
- 2) 総理府・厚生省令: 一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分に係る技術上の基準を定める命令, 1998.6.15.
- 3) 水野克己: 最終処分場における 3 層構造遮水システムの開発及び施工例, 第 8 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.824-827, 1997.
- 4) 檜垣貫司: 管理型最終処分場のしゃ水工の施工その 2, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 3 部

- (B), pp.828-829, 1998.
- 5) 田村高雄: 現地混合によるベントナイト混合土遮水バリアの透水特性, 第 9 回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.870-873, 1998.
- 6) 飯島健, 勝又正治, 高木亨, 清水英樹: 信頼性の高い廃棄物最終処分場の遮水工構築に関する研究, 前田建設技術研究所報, Vol.43, pp.95-100, 2002.
- 7) 小峯秀雄: ベントナイト系遮水材の透水特性と内部構造観察結果に基づく評価の試み, 土と基礎, Vol.49, No.2, pp.17-20, 2001.
- 8) 永友大彰, 今泉繁良, 土居洋一, 中田雅夫, 戸村豪治: 現地発生土を使用したベントナイト混合土の配合設計と実施例, 第 6 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.325-330, 2005.
- 9) 土居洋一, 須川智久, 黒島一郎, 戸村豪治, 今泉繁良, 飯塚正樹: 限界添加率に基づくベントナイト混合土の配合設計と現場施工実験, 第 5 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.89-94, 2003.
- 10) 今泉繁良, 渡昌純, 土居洋一, 黒川幸彦, 高橋直樹: 多孔質土材料を用いたベントナイト混合土の限界添加率に関する研究, 第 7 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.231-234, 2007.
- 11) 高橋直樹, 黒川幸彦, 戸村豪治, 土居洋一: 多孔質材料を用いたベントナイト混合土の配合設計に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告, No.4, pp.77-82, 2006.
- 12) NPO 最終処分場技術システム研究協会: 廃棄物最終処分場遮水システムハンドブック, pp.111-112, 2008.
- 13) Komine, H. and Ogata, N. : Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, Soils and Foundations, Vol.39, No.2, pp.83-97, 1999.
- 14) Filippo Santucci de Magistris, Francesco Silvestri and Filippo Vinale : Physical and mechanical properties of compacted silty sand with low bentonite fraction, Canadian Geotechnical Journal, Vol.35, pp.909-925, 1998.
- 15) 緒方信英, 小峯秀雄, 堀江芳博, 石井 卓, 三谷泰浩: ベントナイト混合土の透水特性と骨材との関係について, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集 (第 3 部門), pp.1080-1081, 1993.
- 16) ASTM: Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Standard Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, 2001 ASTM D5084-90, 1990.