

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

Study on the Design Method of Bentonite Mixture Soil Liner using Tuffaceous Sandstone

高橋 直樹 NAOKI TAKAHASHI

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

戸村 豪治 GOJI TOMURA

土木営業第一部 土居 洋一 YOICHI DOI

本研究では、凝灰質砂岩碎石を母材として用いたベントナイト混合土に対して締固め試験および透水試験を実施し、その締固め特性を明らかにした。また、透水係数とベントナイト添加率との関係を示すとともに、透水係数がベントナイト添加率 15%程度でベントナイト混合土としての基準値を満足することを確認した。さらに、限界添加率を用いた修正配合設計法が、凝灰質砂岩碎石のような多孔質材料に対しても適用可能であることを検証した。

キーワード：凝灰質砂岩，ベントナイト混合土，透水試験

To evaluate the applicability of tuffaceous sandstone for bentonite mixture soil liner, the compaction tests and permeability tests were carried out. The relationships between the addition rate of bentonite and both compaction characteristics and permeability coefficient have been investigated. The coefficient of permeability at the addition rate 15% of bentonite was estimated smaller than the reference value of bentonite mixture soil liner at final disposal site. It was confirmed that the corrected design method of bentonite mixture soil liner was applicable to the tuffaceous sandstone.

Key Words: Tuffaceous Sandstone, Bentonite Mixture Soil Liner, Permeability Test

1. はじめに

廃棄物最終処分場において、廃棄物からの浸出水の漏洩を防止する遮水工は最も重要な施設のひとつである。構造基準では、遮水構造として①遮水シート+粘性土層、②遮水シート+水密アスファルトコンクリート、③二重遮水シートの3種類のいずれかの複合構造を採用することが定められている。これらの遮水工のうち、①の粘性土層を設ける方法のひとつとして、環境負荷低減およびコスト低減の観点から現地発生土にベントナイトなどの安定材を加え遮水性能を向上させた混合土層を採用するケースが増えつつある。これをベントナイト混合土工法といい、当社は“ソイルレイヤー工法”という名称で研究開発を進めてきた。

ベントナイト混合土の品質を満足させるためには、母材として使用する土質材料の特性を把握し、ベントナイトなどの混合量および混合方法を決定する必要がある。また、現地発生土を母材として用いる場合、それが必ずしも適切な材料とは限らず、他の土質材料も混合しなければならない場合もある。

著者らは、宮崎処分場において本工法を適用しベントナイトの混合方法、施工方法、管理方法など品質向上のための技術開発を行ってきた¹⁾。また、まさ土、山砂、泥岩などのさまざま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の適用性を確認する実験を行うとともに^{2),3)}、山砂を母材として用いたベントナイト混合土の実験結果から、ベントナイトの限界添加率を用いた配合設計方法の提案を行った⁴⁾。さらに、多孔質材料までを対象とするための土粒子内の微細な空隙を考慮した修正配合設計方法も示した⁵⁾。

本研究では、ベントナイト混合土の適用範囲拡大を目的として、栃木県那珂川流域に分布する凝灰質砂岩碎石を母材として用いた場合の検討を行った。締固め試験および透水試験を実施し、実験結果から、ベントナイト添加率 15%程度で要求性能を満足する品質が確保できること、および限界添加率を用いた修正配合設計方法が適用できることを確認した。

2. 配合設計法の適用拡大

(1) 配合設計法

管理型最終処分場の構造基準による粘性土層の要求性能は透水係数 $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 以下で、室内試験においては $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以下を満足する必要がある。一方、ベントナイト混合土の透水係数は、ベントナイトの添加率を増加させていくとある一定値（母材および添加するベントナイトの材質によって異なる）に近づいていく。これを限界添加率と定義⁶⁾しており、透水係数が最小となる時のベントナイトの最適添加率となる。

ベントナイト混合土の配合設計においては、基準値を満足する添加率と限界添加率との間で、トラフィカビリティー等を考慮してベントナイトの設計添加率を設定する。限界添加率は、ベントナイトの膨潤を考慮した土中の間隙比（マクロ間隙比と定義する）が0になるときの添加率で表すことができる。ここで、マクロ間隙比 e_m は、式(1)で計算され、 $e_m=0$ のときの α がベントナイトの限界添加率となる。

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

ここに、

α : ベントナイト添加率(%)

β : ベントナイト膨潤率

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)

ρ_s および ρ_b は土粒子の密度試験 (JIS A 1202) から求める。 $\rho_{d \max \alpha}$ とベントナイト添加率 α との関係は、締固め試験 (JIS A 1210) を数回繰り返し実施して求める。また、ベントナイト膨潤率 β については目的に応じて幾つかの評価方法が存在するが、式(1)におけるベントナイト膨潤率 β について、横山ら⁵⁾は次のようにして決定することを提案している。すなわち、加圧可能な円柱型容器に 50g のベントナイトを入れ、約 1cm の高さになるように突き棒で締固めた後、上面を平滑に成形しその初期高さ (h_1) を測定する。次に、十分な量の蒸留水を加えて空気圧(392kPa)を与え、ベントナイトが完全に膨張した後のベントナイトの高さ (h_2) を測定し、初期高さ (h_1) との比 ($=h_1/h_2$) をベントナイト膨潤率 β とする。

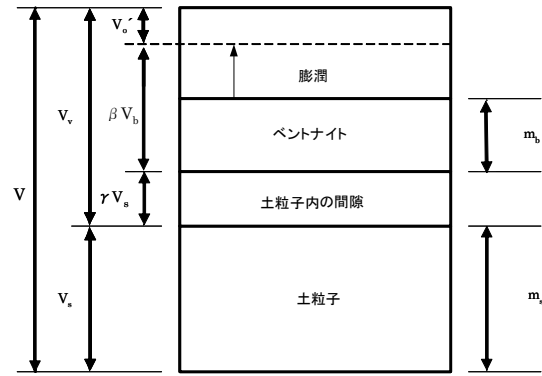


図-1 土粒子内の間隙を考慮した示相図

(2) 修正配合設計法

式(1)は、山砂を母材として用いたベントナイト混合土を対象として導かれたものであるが、著者ら⁶⁾はこの式を多孔質な火山灰質土であるシラスを用いたベントナイト混合土へ適用した。その結果、式(1)から与えられるマクロ間隙比=0 に対応したベントナイトの限界添加率は透水係数が一定となる添加率よりも大きくなり、多孔質材料には式(1)が適用できないことが判明した。これは、多孔質な火山灰質土では、土粒子内に微細な間隙が存在しているが、式(1)から求められる限界添加率はこのような間隙までも充填するものとしてベントナイト添加量を過大に計算していると考えた。

いま、図-1 に示すような土粒子内の示相図を考える。このとき、 V が全体積(cm^3)、 V_s が土粒子の体積(cm^3)、 V_v が土粒子以外の体積(cm^3)、 γV_s が土粒子内間隙部分の体積(cm^3)、 γV_s が土粒子内間隙部分の体積(cm^3)、 V_b がベントナイトの体積(cm^3)、および V_0 が空隙部分の体積(cm^3)である。土粒子内の微細な間隙の体積を γV_s とし、この間隙はベントナイトの膨潤では満たすことができないとする。 γ は土粒子の微細な空隙の比率を表す係数であり、微細空隙比と定義した。微細空隙比 γ は一般的な土においては数%以下であり、ベントナイトの添加率に考慮する必要のない値であるが、多孔質なシラス等では数十%となり影響が大きい。微細間隙比は、簡易的に吸水率試験等によって概略値を求めることが可能である。

このような多孔質材料に対しては、定義した微細間隙比を用いて従来のマクロ間隙比の式を修正した、修正式(2)を提案した。なお、本式における各定数は、式(1)と同一である。

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



写真-1 試料 A



写真-2 試料 B

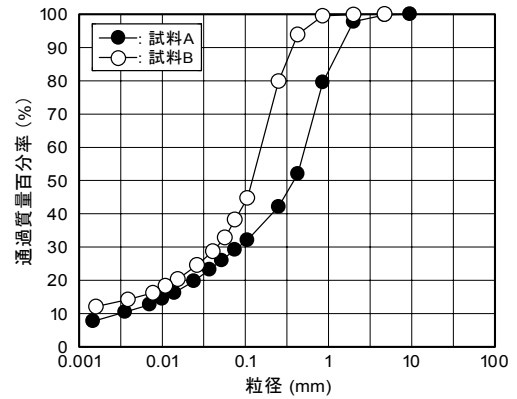


図-2 粒径加積曲線

表-1 凝灰質砂岩碎石の物理的特性

分類	項目	記号	単位	試料	
				A	B
一般	土粒子の密度	ρ_s	(g/cm^3)	2.672	2.437
	自然含水比	w	(%)	22.7	47.7
粒度	礫分 (2~75mm)		(%)	2	0
	砂分 (0.075~2mm)		(%)	69	62
	シルト分 (0.005~0.075mm)		(%)	18	23
	粘土分 (0.005mm未満)		(%)	11	15
	最大粒径		(mm)	9.5	4.75
	均等係数	U_c		169	-
コンシステンシー特性	曲率係数	U'_c		4.03	-
	50%粒径	D_{50}	(mm)	0.391	0.124
	10%粒径	D_{10}	(mm)	0.0247	0.0143
	液性限界	w_L	(%)	43.1	76.3
コンシステンシー特性	塑性限界	w_p	(%)	23.4	43.3
	塑性指数	I_p		19.7	33
	コンシステンシー指数	I_c		1.034	0.867
	微細空隙比	γ		0.412	0.491

3. 室内配合試験

(1) 目的

最終処分場の遮水層に用いられるベントナイト混合土には、現地発生土を母材として用いる。本来、難透水性の遮水層を構築するという目的からすると、土質材料としては適切ではないが、経済性、環境負荷低減の観点から、母材として使わざるを得ない場合も考えられる。そこで、遮水性能の観点から良質な材料ではない凝灰質砂岩を母材として用いるベントナイト混合土の配合試験を行い、適用可能か検討した。

(2) 凝灰質砂岩碎石の物理特性

栃木県那珂川流域に分布する凝灰質砂岩は、容易に破碎することができ、地元では破碎したものを「山砂」として用いている。この凝灰質砂岩は、多孔質であり、最適含水比が高く最大乾燥密度が低いなど、特異な特性が認められる。

写真-1 および写真-2 は、二箇所の風化露頭現場で採取した凝灰質砂岩の破碎前の状況を示している。試料 A が茶色であるのに対して試料 B は緑色であり、両者の鉱物組成が異なることがわかる。また、岩塊はいずれも軟質で容易に破碎可能であるため、実験では写真に示す状態のものを手でほぐして試料として用いた。

図-2 は、JIS A 1204 に基づき行った粒度試験の結果を示したものである。最大粒径は試料 A が 9.5mm、試料 B が 4.75mm、レキ分は試料 A が 2%、試料 B が 0%、砂分は試料 A が 69%、試料 B が 62%、細粒分は試料 A が 29%、試料 B が 38%である。また、試料 A に関し、均等係数 $U_c=169$ 、曲率係数 $U'_c=4.03$ である。

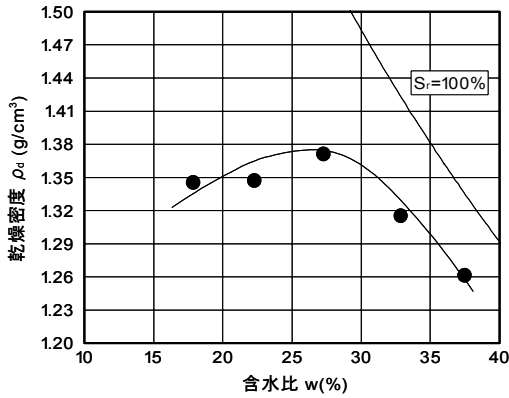
微細空隙比 γ は、前述したように吸水率試験等によって求めることができるが、今回は簡易的に表面乾燥飽和状態での含水比から評価した。その値は、試料 A が 0.412、試料 B が 0.491 であった。

以上の結果をまとめ、表-1 に凝灰質砂岩碎石の物理的特性を示す。試料 B は、試料 A に対し細粒分が多く土粒子の密度も小さい。風化の程度は、試料 B の方が試料 A よりも進んでいるものと推察される。

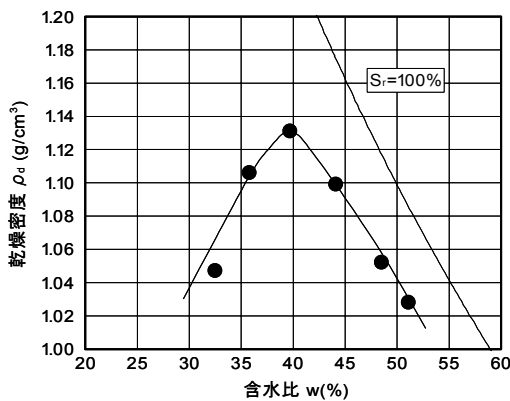
(3) 凝灰質砂岩碎石の締固め特性

締固め試験は、JIS A 1210 に準拠して A-c 法(ランマ一質量 2.5kg、モールド内径 150mm、1 層当たり突固め回数 25 回)で実施した。凝灰質砂岩碎石の締固め試験結果を図-3 に示す。

図より、試料 A に関して最適含水比は $w_{opt}=26.7\%$ 、それに対応する最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.372\text{g}/\text{cm}^3$ であることがわかる。同様に、試料 B については、最適含水比が $w_{opt}=39.4\%$ であり、それに対応する最大乾燥密度は



(a) 試料 A



(b) 試料 B

図-3 凝灰質砂岩砕石の締固め特性

$\rho_{dmax}=1.132\text{g/cm}^3$ であった。まさ土を対象とした既往の締固め試験結果²⁾では、最適含水比が $w_{opt}=12\sim13\%$ 程度、対応する最大乾燥密度は $\rho_{dmax}=1.8\sim1.9\text{g/cm}^3$ であった。これと比較すると、今回用いた凝灰質砂岩砕石は、最適含水比が大きく最大乾燥密度が小さい傾向となっている。

(4) 凝灰質砂岩砕石の透水特性

透水試験は JIS A 1218 に準拠して変水位透水試験法により実施した。試験には $\phi=200\text{mm}$ の鋼製モールドを使用し、供試体の直径は 150mm 、高さは 125mm である。供試体は、最適含水比状態の試料を 2.5kg ランマーで 3 層 25 回の条件で締固めて作成した。なお、供試体側面に水みちが生じることが懸念されたため、モールドと供試体の間にはアスファルトを充填し、水みちの発生を防止した。

透水係数は、試料 A が $7.13\times 10^{-4}\text{cm/sec}$ 、試料 B が $3.56\times 10^{-4}\text{cm/sec}$ であった。まさ土の透水係数は、通常 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{cm/sec}$ であることから、両試料の透水性はまさ

表-2 ベントナイトの特性

水分	(%)	7.5
膨潤力	(ml/2g)	38
pH		9.8
液性限界	(%)	581
塑性限界	(%)	38
塑性指数		543
メレンブルー吸着量	(ml/0.5g)	49
密度	(g/cm ³)	2.86

土と比較して若干小さい。

(5) ベントナイト混合土の締固め特性

凝灰質砂岩砕石を母材として用いたベントナイト混合土に対し、JIS A 1210 に従って A-c 法で締固め試験を実施した。使用したベントナイトは、米国ワイオミング州 COLONY 鉱山から産出されたナトリウム型のものである。その基本的な特性を表-2 に示す。なお、前述した方法により求めたベントナイト膨潤率 β は 5.84 である。ベントナイト添加率はシラスの試験結果を考慮し、また、今回は限界添加率を確認するためやや大きくして、10,15,20%とした。

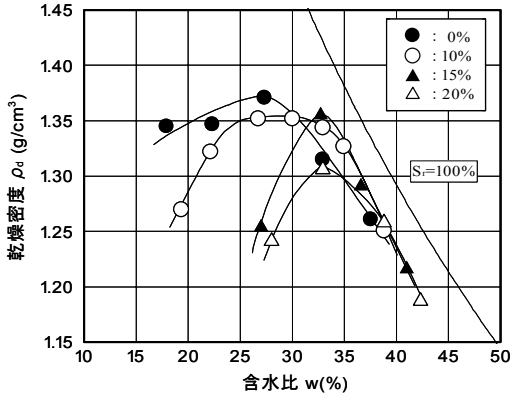
試験から得られた乾燥密度と含水比との関係を図-4 に、図から得られる添加率ごとの最適含水比とそれに対応した最大乾燥密度を表-3 に示す。なお、図-4 および表-3 には、先に示したベントナイト添加率 0%の結果も併せて示した。また、図-5 にベントナイト添加率と最適含水比との関係、図-6 にベントナイト添加率と最大乾燥密度との関係を示す。

図-5 をみると、いずれの試料においても最適含水比がベントナイト添加率の増大に伴って大きくなる傾向を示しており、この傾向は試料 A のほうが明確である。永友ら³⁾は、最適含水比がベントナイト添加率の増大に伴い大きくなることを示しているが、本実験結果もこれに整合するものである。

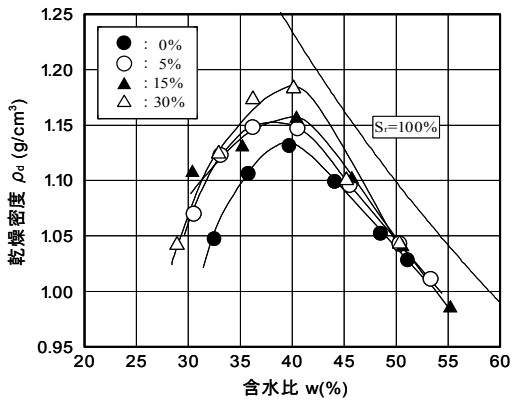
一方、図-6 から、試料 A の最大乾燥密度はベントナイト添加率が大きくなると若干ではあるが小さくなる傾向を示すのに対し、試料 B のそれはベントナイト添加率の増大に伴って大きくなる傾向を示していることがわかる。このことから、最大乾燥密度とベントナイト添加率の関係は、母材の粒度特性によって異なるものと推察される。

(6) ベントナイト混合土の透水特性

ベントナイト混合土の透水試験は、凝灰質砂岩砕石の場合と同様、JIS A 1218 に準拠して変水位透水試験法により実施した。使用したモールドや供試体の寸法も、



(a) 試料 A



(b) 試料 B

図-4 ベントナイト混合土の締固め特性

表-3 ベントナイト添加率ごとの締固め特性

試料	ベントナイト添加率	最適含水比 W_{opt} (%)	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)
	α (%)		
A	0	26.7	1.372
	10	30.0	1.352
	15	32.7	1.355
	20	32.9	1.306
B	0	39.4	1.132
	10	38.3	1.153
	15	40.4	1.156
	20	40.1	1.183

(4) 項で述べた添加率 0%の場合と同一である。なお、供試体密度は、表-3 に示した最大乾燥密度の 90%の値とした。図-7 に、透水係数とベントナイト添加率との関係を示す。

試料 A および試料 B のいずれも、透水係数はベントナイト添加率の増大に伴い小さくなるのが明らかである。また、試料の違いによらずベントナイト添加率 15%~20%の範囲において、透水係数が一定となることもわかる。ベントナイト添加率 15%における透水係数は、試料 A が $5.46 \times 10^{-8} cm/sec$ 、試料 B が $3.56 \times 10^{-8} cm/sec$ であった。遮水層としての透水係数の基準値は室内試験

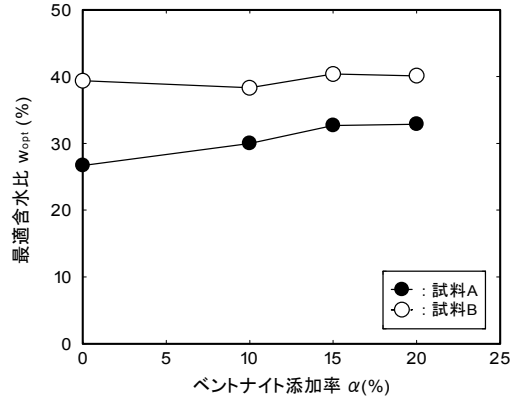


図-5 ベントナイト添加率と最適含水比との関係

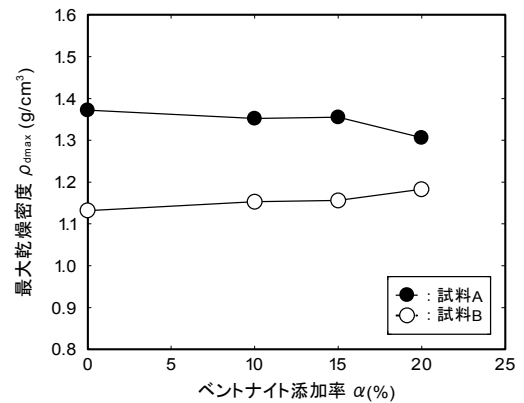


図-6 ベントナイト添加率と最大乾燥密度との関係

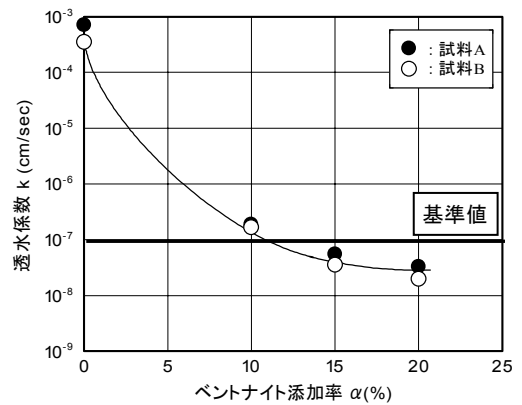


図-7 ベントナイト添加率と透水係数との関係

表-4 入力パラメータ

項目	記号	単位	試料A	試料B
ベントナイト膨潤率	β			5.84
微細空隙比	γ		0.412	0.491
土粒子密度	ρ_s	(g/cm^3)	2.672	2.437
ベントナイト密度	ρ_b	(g/cm^3)		2.86

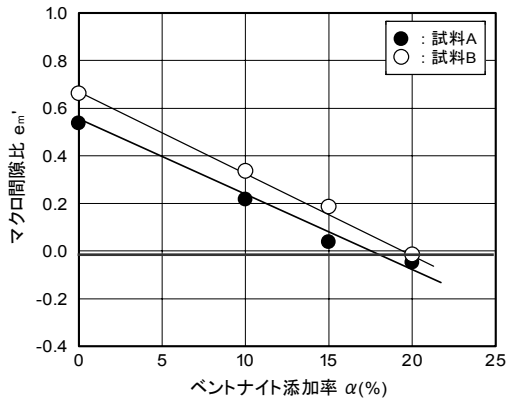


図-8 マクロ間隙比とベントナイト添加率との関係

において $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 以下であり、添加率 10~15%程度以上で基準値を満足する結果となった。また、透水係数が一定となる限界添加率は試料 A, B とも 15~20%程度と推定される。今回母材として用いた凝灰質砂岩碎石の場合、ややベントナイトの添加量が多くなるが、最終処分場の遮水層として適用可能である。

(7) 限界添加率

図-8 は、式(2)に表-3 および表-4 に示した各パラメータを用いて求めたマクロ間隙比 e_m とベントナイト添加率 α との関係を示したものである。図より、試料 A の限界添加率は約 17%、試料 B のそれは約 19%であることがわかる。これらの値は、図-7 で示した透水係数が一定となる添加率 15%~20%程度と整合するものであり、式(3)が凝灰質砂岩碎石のような多孔質材料へ適用可能なことが明らかである。

したがって、今回の凝灰質砂岩を母材として用いる場合、ベントナイト設計添加率は 13%程度~20%の間で設定すればよいことになる。

4. おわりに

凝灰質砂岩碎石を母材に用いたベントナイト混合土の締固め試験および透水試験を実施し、その締固め特性や遮水性能について検討した。さらに、修正した限界添加率を用いた配合設計方法が、本材料について適用可能であるかを検討した。

試験結果により、凝灰質砂岩碎石は母材として適切な材料ではないが、ベントナイト添加量を増加させることによって母材として使用可能であることが確認された。

以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- ① 締固め特性について、ベントナイト添加率と最適含水比との関係から、最適含水比はベントナイト添加

率の増大に伴って大きくなる傾向を示した。

- ② 本材料を用いたベントナイト混合土の透水係数は、添加率 15%で 10^{-8}cm/sec オーダーの値となり、基準値 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ を満足する品質を確保できた。
- ③ 多孔質な火山灰質土等の微細空隙比を考慮したマクロ間隙比の修正提案式が、本材料についても適用可能であり、修正式から求めたベントナイトの限界添加率は試験結果とほぼ一致した。

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。ご指導頂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) 須川智久, 土居洋一, 三上博, 戸村豪治, 今泉繁良, 飯塚正樹: まさ土を母材とするベントナイト混合土の現場施工実験, 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2403-2404, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 横山能史, 土居洋一, 三ヶ田能, 今泉繁良: たわみ性壁透水試験装置を用いたベントナイト混合土の評価, 第 4 回環境地盤工学シンポジウム論文集, pp.303-306, 2001.
- 6) 土居洋一, 今泉繁良, 吉直卓也, 高橋直樹: しらすを用いたベントナイト混合土の透水特性に関する研究, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演集 (投稿中)