

ベントナイトを用いた緩衝材の 材料仕様と締固め特性の関係

増田良一¹・雨宮清²・千々松正和³・足立格一郎⁴・小峯秀雄⁵

¹正会員 (財)原子力環境整備促進・資金管理センター 事業環境整備研究プロジェクト
(〒105-0001東京都港区虎ノ門2-8-10) E-mail: masuda@rwmc.or.jp

²正会員 学術博 (株)間組 技術・環境本部 山口大学客員教授 (〒107-8658東京都港区北青山2-5-8)

³正会員 工博 (株)間組 技術・環境本部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁴フェロー会員 Ph.D. 芝浦工業大学教授 工学部土木工学科 (〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14)

⁵正会員 工博 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の仕様設計および緩衝材施工システムの構築にあたっては、施工面からの合理性・確実性を確保するため、材料となるベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め特性の把握が必要である。本研究では、緩衝材の主要な仕様項目であるケイ砂混合率、含水比、使用ベントナイトをパラメータとした静的締固め試験を実施し、緩衝材の主要な仕様項目と締固め特性の関係の明確化を行った。また、静的、動的締固め特性の比較並びに電子顕微鏡による粒子状態の観察から、締固め機構について考察を加え、粒子挙動の観点から緩衝材の締固めにおける影響因子、留意点の検討を行った。

Key Words: bentonite, specification of buffer material, compaction characteristics, particle action mechanism, radioactive waste disposal

1. はじめに

緩衝材は、放射性廃棄物の地層処分において廃棄物の周辺に構築される、ベントナイトを主材料とした人工バリアのひとつである。図-1および表-1に核燃料サイクル開発機構による「地層処分研究開発第2次とりまとめ」(以下、第2次とりまとめ)で示された高レベル放射性廃棄物処分における緩衝材仕様の設計例を示す¹⁾。緩衝材の施工方法は、大きくはブロック方式²⁾や一体型緩衝材方式³⁾のように地上施設で圧縮成型した材料をハンドリング・定置する方法および原位置締固め方式のように処分原位置で締固めを行う方法に分類される。緩衝材の材料であるベントナイトを主体としたケイ砂混合材料もしくはベントナイト単体(以下、ベントナイト単体の場合も含め、便宜的にベントナイト・ケイ砂混合材料と称す)の締固めを地上施設内で行うブロック方式、一体型緩衝材方式では大規模プレスやCIP(冷間等方圧加圧装置)等の大型設備を用いた静的締固めによる成型が検討されており、一方、作業空間が制約される地下坑道内で締固めを行う原位置締固め方式では、重錘落下による動的締固めが有力な施工方法と考えられている。いずれの方法も材料の締固め特性を把握し、十分な施工性を確保した緩衝材仕様および施工設備の設計を行う必要がある。

緩衝材の主要な仕様項目は、使用材料、ケイ砂混合率、

含水比、乾燥密度であり、合理的な緩衝材仕様の設計および緩衝材施工システムの構築を行うためには、これらの仕様項目と締固め特性の関係の把握が重要である。しかし、ベントナイトを高密度に締固めて利用する例は少なく、緩衝材の仕様設計および緩衝材施工システムの構築に資するに十分なデータの整備は行われていない。放射性廃棄物処分分野では、核燃料サイクル開発機構⁴⁾や小

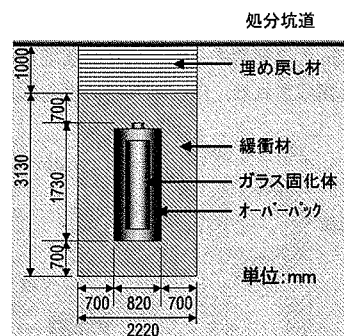


図-1 人工バリア基本レイアウト例(縦置き)¹⁾

表-1 緩衝材の仕様例¹⁾

	仕様
材料	ベントナイトとケイ砂の混合物
ケイ砂混合率	ベントナイト/ケイ砂 = 7/3
乾燥密度	1.6 Mg/m ³
緩衝材厚さ	700mm

峯・緒方⁹⁾により基礎的な締固め特性に関するデータ取得が行われているが、検討範囲は限定されている。処分事業の進展に伴う多様な条件への対応を考慮した合理的な緩衝材施工システムの構築に向けて、より幅広い条件範囲でのベントナイト・ケイ砂混合材料の締固めに関する知見の拡充が必要と考えられる。

上記に対して筆者らは、緩衝材の主な仕様項目をパラメータとした静的締固め試験により、それぞれの仕様項目と締固め特性の関係を整理し、また、成型圧力と得られる乾燥密度を定式化することで、緩衝材の仕様と材料としての締固め特性の関係の明確化を行った。さらに、静的、動的締固め特性の比較および電子顕微鏡による締固めた材料の粒子状態の観察から、ベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め時の粒子挙動メカニズムについて考察を加え、締固めのメカニズムの観点から締固め特性に対する影響因子、評価・管理を行う上での留意点について検討を行った。

2. 緩衝材の静的な締固め特性

本章では、ベントナイト・ケイ砂混合材料を対象に、緩衝材の主要仕様項目（ケイ砂混合率、含水比、使用ベントナイト）をパラメータとした静的な圧力による締固め試験の結果に基づき、各仕様項目と締固め特性の関係および成型圧力と得られる乾燥密度の定量的な関係を把握し、緩衝材の静的な締固め特性の明確化を行った結果を報告する。

(1) 静的締固め試験の方法

a) 試験装置および試験手順

試験に用いた締固め試験装置を図-2に示す。試験装置は内径50mmの金属製モールドおよび直径49mmの締固め治具から構成される。モールド内に投入した材料を、

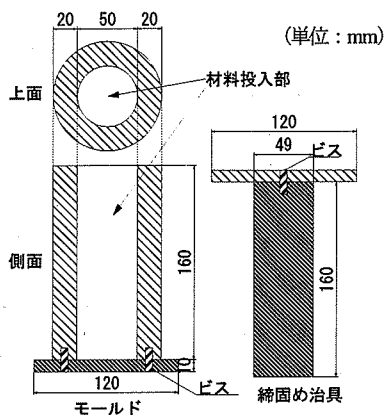


図-2 静的締固め試験装置（モールドおよび治具）

プレスにより締固め治具に圧力を加えることで静的に締固める機構となっている。本試験では、b)項に示す仕様の材料に対して、成型圧力を1MPaから101MPaまで8段階に分けて載荷し、それぞれの成型圧力を与えた状態の供試体の厚さから、材料毎に成型圧力 p で圧縮した場合に得られる乾燥密度 ρ_d を取得した。また、101MPaまで載荷した後に、供試体をモールドから取り出し、除荷後の供試体の乾燥密度の測定も行った。圧力保持時間（成型時に圧力を作用させる時間）は試験時間の都合により3分とした。なお、圧力保持時間が締固めに及ぼす影響は、(3)節a)項で述べる。

静的締固め試験における締固め条件を表-2にまとめる。

b) 供試体材料の仕様

試験に用いた材料の仕様を表-3に示す。ベントナイトは、山形県月布産のNa型ベントナイトであるクニゲルV1および米国ワイオミング州産のNa型ベントナイトであるMX-80を試験対象とした。MX-80は、ベントナイト種類による締固め特性の違いを検討する目的で試験対象とした。混合するケイ砂については、事前に実施したケイ砂仕様(粒径および配合比)をパラメータとした予備締固め試験において、最も高い乾燥密度が得られた3~7号ケイ砂を乾燥質量比で均等に混合したものを用いた。使用したケイ砂の粒径加積曲線を図-3に示す。ケイ砂混合率(以下、 R_s で示す)は、 $R_s=0\%$ 、 30% 、 50% の3ケースを設定し、それぞれ目標含水比を $w=0\sim 20\%$ の範囲において2%間隔で設定した。なお、ケイ砂混合率 R_s は、材料の全乾燥質量に対するケイ砂の乾燥質量の割合を示すものである。含水比の調整は霧吹きを用いて行い、調湿・混合から24時間以上養生した材料を試験に供した。

表-3に示したモンモリロナイト含有率は、ベントナイト全量に対してモンモリトナイトの占める割合を示すも

表-2 静的締固め試験条件

項目	仕様	
供試体寸法	直径	50mm
	厚さ	20~30mm (仕上がりの乾燥密度に依存)
材料投入量	100g	
成型圧力 p	1MPa~101MPa 8段階に分けて載荷 1→3→5→11→27→53→80→101 (MPa)	
成型保持時間	3分	

表-3 供試体材料の仕様

項目	試験条件	
使用材料	ベントナイト	クニゲルV1 (モンモリト含有率59%) MX-80 (モンモリト含有率69%)
	ケイ砂	3,4 (S,L), 5,6,7号 ケイ砂混合 (乾燥質量比で均等に配合)
ケイ砂混合率	$R_s = 0, 30, 50\%$ (乾燥質量比)	
含水比 (目標)	$w = 0\sim 20\%$ (2% 間隔で11ケース設定)	
施工目標乾燥密度	緩衝材ブロック方式: $\rho_d \geq 1.9 \text{ Mg/m}^3$ 原位置締固め方式: $\rho_d \geq 1.6 \text{ Mg/m}^3$	

のである。高純度ベントナイトであるクニピア F のモンモリロナイト含有率を 100% と仮定し、モンモリロナイト量を示す指標となるメチレンブルー吸着量試験 (MBC 試験) 結果⁶⁾ から、式(1)により概略の値を推定した。

$$C_m = \frac{MBC}{MBC_{100}} = \frac{MBC}{140} \quad (1)$$

ここに、

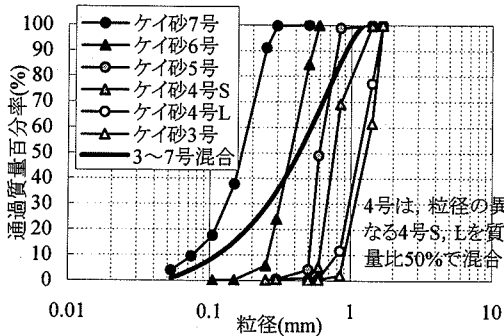


図-3 使用したケイ砂の粒径加積曲線

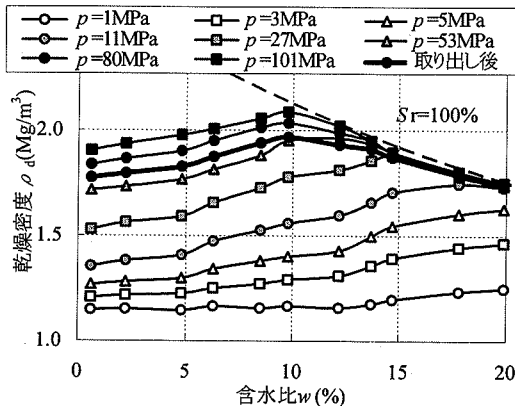


図-4 締固め曲線 (静的/クニゲルV1/Rs=0%)

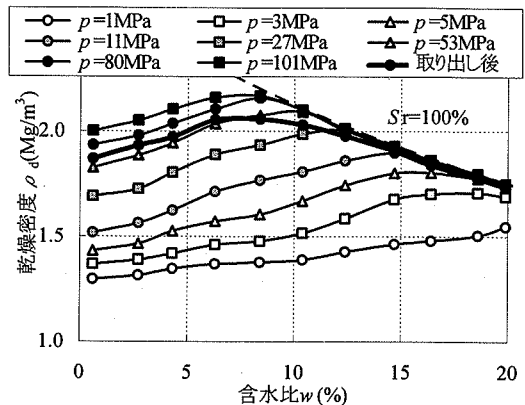


図-5 締固め曲線 (静的/クニゲルV1/Rs=30%)

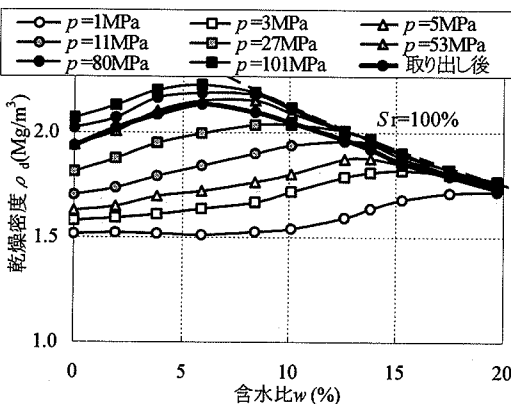


図-6 締固め曲線 (静的/クニゲルV1/Rs=50%)

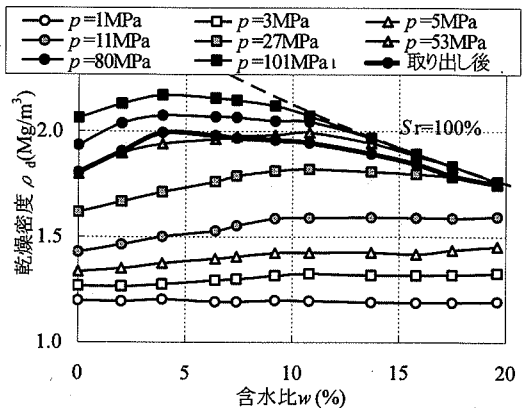


図-7 締固め曲線 (静的/MX-80/Rs=0%)

C_m : ベントナイト中のモンモリロナイト含有率(%)
 MBC : ベントナイトのメチレンブルー吸着量(mmol/100g)
 MBC_{100} : クニピア F のメチレンブルー吸着量(mmol/100g)
 (メーカ聞き取り調査 140mmol/100g)

試験に供した材料の仕様を整理すると、下記のとおりとなる。

- ① クニゲルV1 100%
 - ② クニゲルV1 70% + ケイ砂 30%
 - ③ クニゲルV1 50% + ケイ砂 50%
 - ④ MX-80 100%
- (各材料 $w=0\sim 20\%$ の範囲で 11 ケースの目標含水比を設定)

(2) 試験結果および傾向分析

a) 試験結果

試験により得られた成型圧力 p と乾燥密度 ρ_d の関係について、締固め曲線として整理したものを図-4~7に示す。グラフ上には、各圧力を載荷した状態で得られた供試体の乾燥密度を示しているが、加えて、除荷後の供試

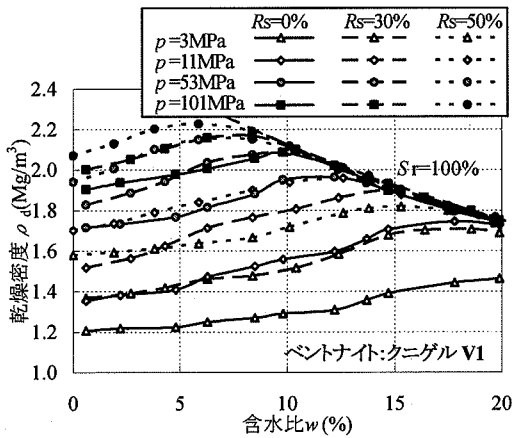


図-8 締固め曲線の比較 (ケイ砂混合率)

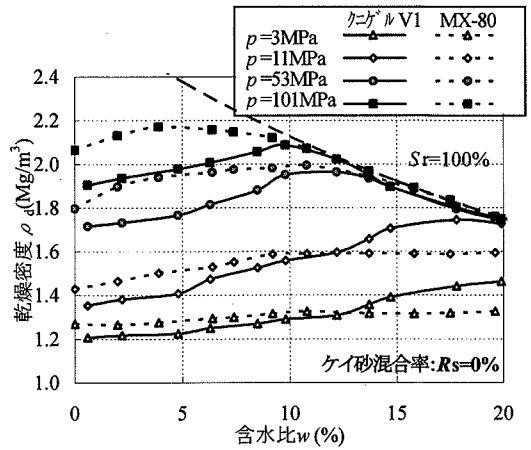


図-9 締固め曲線の比較 (ベントナイト種類)

体の乾燥密度を太線で示した。図を見ると除荷に伴う乾燥密度の低下が確認でき、体積膨張が生じていることが分かる。除荷に伴う体積膨張については次節で整理するものとし、本節では載荷状態で得られた乾燥密度により傾向分析を行うものとする。

b) 締固めの含水比依存性

クニゲルV1を用いた材料を対象とした図-4~6の締固め曲線を見ると、成型圧力が小さい場合には、本試験の含水比範囲で極大点はみられないが、成型圧力が高い場合は最大乾燥密度 ρ_{\max} および最適含水比 w_{opt} が明確に現れている。この傾向は、小峯らによるベントナイトを対象とした静的締固め試験の結果³⁾と一致しており、ケイ砂を混合した場合でも基本的な傾向は変わらない。最適含水比付近では含水比5%の変動に対して最大 0.2Mg/m^3 程度の乾燥密度差が生じており、締固めの含水比依存性の高さが認められる。締固めにおける材料の含水比管理の重要性が窺える。

一方、図-7に示したMX-80の締固め曲線については、全体的に含水比の増減に対する乾燥密度の変化が小さく、クニゲルV1に比べ締固めの含水比依存性が小さい傾向がみられる。この傾向の原因も含めたMX-80の締固め特性については d) 項で詳しく述べるものとする。

c) 締固めに対するケイ砂混合率の影響

図-8に成型圧力 $p=3, 11, 53, 101\text{MPa}$ で締固めたケイ砂混合率の異なる材料の締固め曲線を比較したものを示す。ケイ砂混合率の増加が、材料の締固め性 (材料の締固まり易さを表す言葉として「締固め性」を用いるものとし、材料の締固めに対する全般的な性格を意味する「締固め特性」とは区分する) の向上に繋がることは、核燃料サイクル開発機構の検討でも確認されているが⁴⁾、本試験でも同様の結果となっている。本試験では、より幅広い仕様の材料について試験対象としたが、ケイ砂混合率の増加により試験対象とした条件範囲の全域において高い乾

表-4 クニゲルV1, MX-80の物理特性^{*}

項目	ベントナイト	クニゲルV1	MX-80
粒度分布	最大粒径 (mm)	0.075	0.85
	通過百分率60%粒径 D_{60} (mm)	0.001	0.29
	通過百分率30%粒径 D_{30} (mm)	測定不能	0.14
アッターベルグ限界	液性限界 w_L (%)	423	412
	塑性限界 w_p (%)	21.9	34.5
	塑性指数 I_p	401.1	377.5

^{*} 試験に供した材料と製造ロットが異なるため参考扱いとする。

燥密度が得られており、幅広い条件において締固め性の向上に寄与することを確認した。

d) 締固めに対するベントナイト種類の影響

図-9にクニゲルV1およびMX-80のベントナイト単体を、成型圧力 $p=3, 11, 53, 101\text{MPa}$ で締固めた場合の締固め曲線を比較したものを示す。MX-80の締固め特性の特徴として、本節b) 項で指摘したとおり、クニゲルV1に比べ含水比による締固め性の変化が小さいことが挙げられる。含水比の減少に伴う乾燥密度の低下の程度が小さいため、湿潤側ではクニゲルV1よりも得られる乾燥密度が低いが、含水比 $w=10\%$ 付近を境に得られる乾燥密度が逆転し、乾燥側ではMX-80の方が乾燥密度が大きい。

この傾向の原因について、それぞれのベントナイトの材料特性の違いの観点から検討を加えた。クニゲルV1並びにMX-80の物理特性について表-4に示す。MX-80は、クニゲルV1に比べモンモリロナイト含有率および塑性限界 w_p が高い。また、それぞれの材料の粒子の状態を比較したものを図-10に示すが、クニゲルV1が微細な粒子で構成される粉末状であるのに対し、MX-80は製造の過程で大きく均一な粒径が与えられており、顆粒状である。

上記の材料特性の違いを踏まえ、まず、湿潤側での締固め特性の傾向について考察を行う。小峯らは、粘土の締固め特性について塑性限界 w_p を用いた締固め特性の評価方法を提案し、塑性限界が低い方が良好な締固め性を

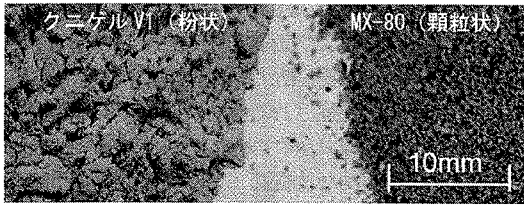


図-10 材料の粒子状態の比較

有することを示している⁷⁾。また、塑性指数 I_p は、塑性状態を呈する含水率の領域の広さを示すものであり、含水比の増減に対する物理特性の変化の感度を示す指標になるものと考えられる。そこで、締固め特性に影響する材料の物理的性質を示す指標として塑性限界および塑性指数に着目し、これらとモンモリロナイト含有率の関係について整理した。図-11および図-12に山形月布産(クニゲルV1⁸⁾、クニピアF⁸⁾)、ワイオミング州産(MX-80⁸⁾、Colony、Lovell)のベントナイトのモンモリロナイト含有率(メチレンブルー吸着量からの推定値)と塑性限界 w_p 、塑性指数 I_p の関係を示した。含まれるスメクタイト、随伴鉱物の違いの影響も無視できないことから単純に比べることは難しいが、全体の傾向として、モンモリロナイト含有率が増加すると塑性限界、塑性指数が高くなる傾向が読み取れる。すなわち、モンモリロナイト含有率が高い材料ほど、塑性変形が生じにくく(締固め性が悪く)、水分変化に対する物理特性の変化の感度が鈍くなるはずである。今回の試験結果を当てはめると、モンモリロナイト含有率が高いMX-80の方が、クニゲルV1に比べ、湿潤側で締固めにより得られる乾燥密度が低く、また、含水比増減に対する乾燥密度の変化の感度が小さい傾向となっており、上記の傾向と一致する。この傾向の原因は、材料中に含まれる水分量が同じであれば、材料中の水分がすべてモンモリロナイト結晶層間に保水されるものと仮定すると⁹⁾、モンモリロナイト含有率が高いほどモンモリロナイトに供給される水分量が減少するためであると考えられる。以上は、締固め特性を評価する上で、塑性限界 w_p 、塑性指数 I_p が締固め性および締固めの含水比依存性を示す評価指標として有効であり、また、ベントナイトの締固め機構を検討する上で、モンモリロナイトの水分状態が重要な評価因子であることを示唆する結果であるといえる。

一方、乾燥側では、MX-80の方が得られる乾燥密度が高く、湿潤側の締固めでみられたモンモリロナイト含有量と締固め特性の関係の傾向が当てはまらない。この原因は、モンモリロナイトに供給される水分が少ないため、ゲル生成等のベントナイト特有の挙動が現れにくく、一般の土質材料に近い粒子挙動を示しているためであると推測される。一般の土質材料において団粒破壊による粒子微細化、粒度分布変化は締固めに影響する重要な現象

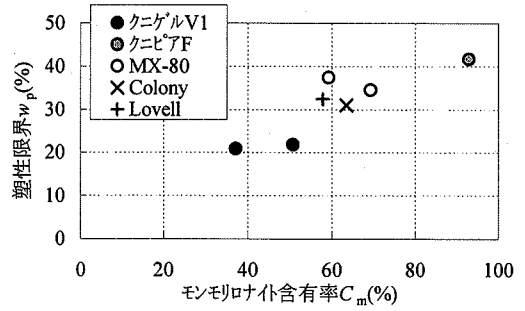


図-11 モンモリロナイト含有量 C_m と塑性限界 w_p の関係

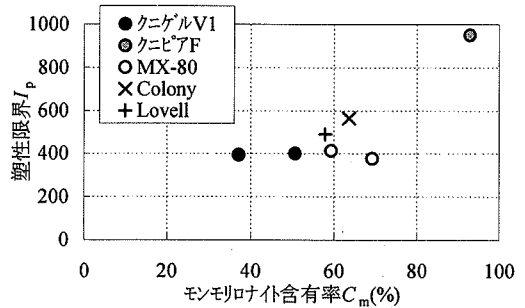


図-12 モンモリロナイト含有量 C_m と塑性指数 I_p の関係

であり、また、粒子径の大きな材料の方が締固めに伴う粒子破碎が著しいことが吉田によって示されている¹⁰⁾。顆粒状で粒径の大きい粒子で構成されるMX-80の方が、粒子破碎およびそれに伴う粒度分布改善により締固め性が向上し、このような傾向が現れたものと考えられる。

上記を整理すると、含水比によって材料の締固め機構、締固め特性が変わる場合があるということであり、今回試験対象とした材料については、湿潤側ではクニゲルV1が、乾燥側ではMX-80が良好な締固め性を発揮する材料特性を有しているといえる。

(3) 成型圧力と乾燥密度の関係

a) リバウンドによる乾燥密度低下に対する補正

図-4~7に示したとおり、圧縮したベントナイト・ケイ砂混合材料は、除荷に伴い体積膨張を生じ、乾燥密度が低下する。封入空気の圧縮、粒子および粒子骨格構造の弾性変形が除荷時に回復することで生じるものと考えられるが、本試験では載荷状態の供試体の乾燥密度を測定しているため、除荷後の乾燥密度は小さくなる。そのため、本節で行う成型圧力と得られる乾燥密度の定式化では、除荷に伴う体積膨張を考慮し、乾燥密度を補正する必要がある。本論文では、除荷に伴う体積膨張をリバウンドと称するものとし、以下にリバウンドによる乾燥密度の低下の傾向と低下量について検討した結果を整理する。

本検討では、除荷直後に発生する体積膨張に伴う乾燥密度の低下率をリバウンド率 R_b とし、式(2)のとおり定義した。圧縮方向以外のリバウンドによる寸法変化はごくわずかであることから、圧縮方向（供試体の厚さ）の寸法変化率をリバウンド率として扱うものとした¹¹⁾。また、体積膨張は経時的にも進行するが、除荷直後に生じる体積膨張に比べ小さいことから¹¹⁾、本検討では考慮しないものとした。

$$R_b = \left(\frac{\rho_{dp} - \rho_d}{\rho_d} \times 100 \right) = \frac{L - L_p}{L_p} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここに、

R_b : リバウンド率 (%)

ρ_d : 乾燥密度 [除荷状態] (Mg/m^3)

ρ_{dp} : 乾燥密度 [載荷状態] (Mg/m^3)

L : 除荷後の材料厚さ(cm)

L_p : 除荷前の材料厚さ(cm)

図-13に、本試験において成型圧力101MPaで締固めた供試体（最大乾燥密度 $\rho_d=2.2\text{Mg/m}^3$ 程度）で測定されたリバウンド率を示した。加えて、同じ試験装置を用い、各材料を乾燥密度 $\rho_d=1.6, 1.9\text{Mg/m}^3$ 、厚さ20mmに締固めた供試体のリバウンド率の測定を行った追加試験結果についても同図に示した。図を見ると、含水比が低く、乾燥密度が高い供試体ほど、リバウンド率が大きい傾向を示すことが分かる。また、ケイ砂混合率が低い方がリバウンド率が大きく、MX-80のみの場合が最も大きなリバウンドを生じている。クニゲルV1を用いた材料の場合、リバウンド率は最大8%程度となっている。

図中の I, II 線は、クニゲルV1を使用した最大

$\rho_d=2.2\text{Mg/m}^3$ 程度の乾燥密度を持つ供試体のリバウンド率を包括する線および乾燥密度 $\rho_d=1.6, 1.9\text{Mg/m}^3$ の供試体のリバウンド率を包括する線を示している。緩衝材の乾燥密度として想定される値を $\rho_d=1.6\sim 1.9\text{Mg/m}^3$ 程度と考え、II線で示すリバウンド率は緩衝材の仕様範囲において現実的な予測値、I線は安全側の予測値と捉えることができる。それぞれの線を表す近似式を式(3)、(4)に示す。次項の成型圧力 p と得られる乾燥密度 ρ_d の関係の検討では、これらの式に基づく乾燥密度の補正を行うものとした。

$$\text{I} : R_b = -0.375 w + 9.366 \quad (3)$$

$$\text{II} : R_b = -0.255 w + 5.100 \quad (4)$$

ここに、

R_b : リバウンド率 (%)

w : 含水比 (%)

なお、ケイ砂混合率によってもリバウンド率は変化するが、定式化が困難であるため、本研究では $R_s=0\sim 50\%$ の供試体のリバウンド率を包含する形で近似式を設定し、ケイ砂混合率に依存しない安全側の補正を行うことで対応するものとした。

また、リバウンドは封入・圧縮された空気の回復が影響しているものとする、締固め前のエア抜き処理（真空引きによる脱気）、圧縮保持時間等締固めの条件によってもリバウンド率が変化する可能性がある。締固めの条件によるリバウンド率の違いを確認するため、別途実施した直径700mmのベントナイトブロック製作性確認試験¹¹⁾で測定された、エア抜きの有無、圧縮保持時間、圧縮回数をパラメータとしたリバウンド率の比較結果を表-5に示した。エア抜きの有無、圧縮保持時間等の締固め条件の違いによりリバウンド率に差がみられるが、その差は小さい。これは、リバウンドにおいて粒子および粒子構造骨格の弾性変形の回復量が卓越しているか、もしくはエア抜き並びに圧縮保持時間の延長が、封入空気量の低減に対して効果が小さいためであると推測される。本検討では、エア抜き無し、圧縮保持時間3分として締固めを実施したが、これらの条件変えた場合でも、リバウンド率は大きく変わらないと考えられる。

b) 成型圧力と得られる乾燥密度の関係

成型圧力 p を加えた場合に得られる載荷状態での最大乾燥密度 ρ_{dp} および最適含水比 w_{opt} の関係を図-14,15に示す。また、図にはケイ砂混合率 R_s 並びに成型圧力 p 、最大乾燥密度 ρ_{dp} 、最適含水比 w_{opt} の関係について、重回帰分析により近似式を導き記載している。それぞれの近似式を下記に示す。

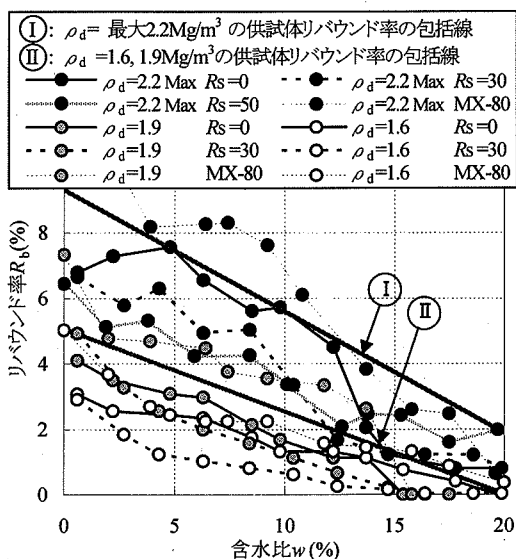


図-13 含水比 w とリバウンド率 R_b の関係

表-5 圧縮条件とリバウンド率の関係¹⁾

ケース名	1A	2A	3A-1	3A-2	1B	2B	3B-1	3B-2	共通条件
含水比 w (%)	4.9	4.9	4.9	4.9	9	9	9	9	成型寸法: $\phi 700 \text{ mm} \times \text{H}300 \text{ mm}$ 成型方法: 金型による一軸圧縮 使用材料: クニゲル V1+ケイ砂 7号 ケイ砂混合率: $R_s=30\%$ 乾燥密度: $\rho_d=1.9 \text{ Mg/m}^3$
エア抜きの有無	有	無	無	無	有	無	無	無	
圧縮保持時間(分)	0	120	0	0	0	0	0	0	
圧縮回数(回)	1	3	1	1	1	3	1	1	
ブロック厚さ(mm)	309.7	308.1	309.9	309.9	308.6	308.2	308.9	307.7	
リバウンド率 R_b (%)	3.2	2.7	3.3	3.3	2.9	2.7	3.0	2.6	

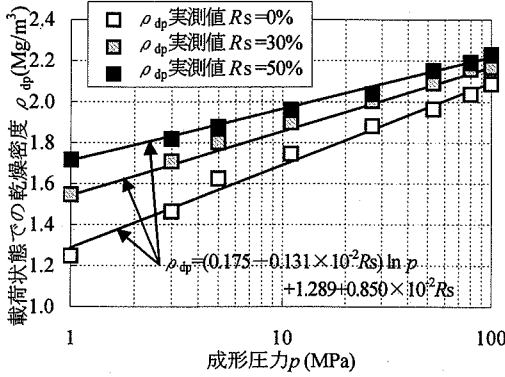


図-14 成型圧力 p と最大乾燥密度 ρ_{dp} の関係

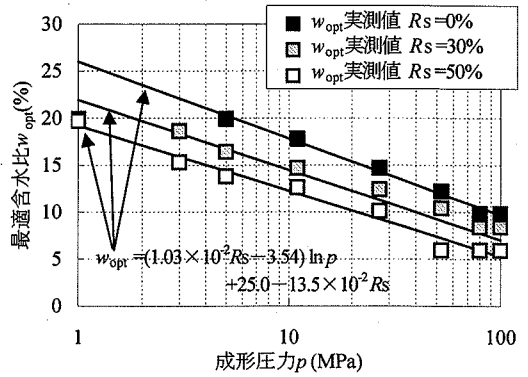


図-15 成型圧力 p と最適含水比 w_{opt} の関係

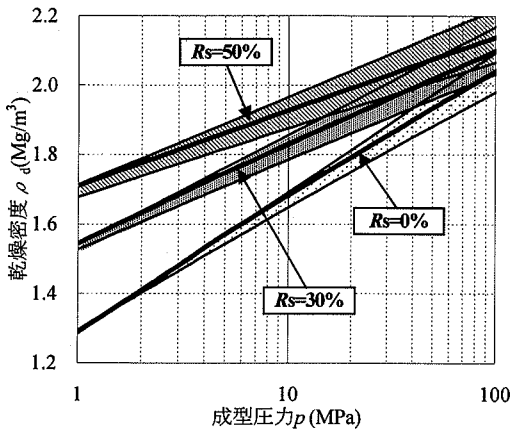


図-16 成型圧力 p と乾燥密度 ρ_d の関係 (リバウンド考慮)

$$\rho_{dp} = (0.175 - 0.131 \times 10^{-2} R_s) \ln p + 1.289 + 0.850 \times 10^{-2} R_s \quad (5)$$

$$w_{opt} = (1.03 \times 10^{-2} R_s - 3.54) \ln p + 25.0 - 13.5 \times 10^{-2} R_s \quad (6)$$

ここに、

- ρ_{dp} : 最大乾燥密度 [除荷状態] (Mg/m^3)
- p : 成型圧力 (MPa)
- w_{opt} : 最適含水比 (%)
- R_s : ケイ砂混合率 (%)

いずれも対数関数を用いることで、実験値を良く再現できている。ただし、式(5)は除荷状態での乾燥密度を導くものであり、リバウンドによる密度低下について補正

が必要である。ここでは、現実的なリバウンド予測式である式(4)に基づく補正を行うものとし、式(4)、(5)、(6)を連立させて、リバウンドを考慮した成型圧力 p と得られる乾燥密度 ρ_d の関係式を導いた。式(7)に關係式を、図-16に $R_s=0\sim 50\%$ の材料の成型圧力 p と乾燥密度 ρ_d の關係を示した。

$$\rho_d = \frac{(-0.131R_s + 17.50) \ln p + 0.850R_s + 128.9}{(-0.261 \times 10^{-2} R_s + 0.902) \ln p + 3.450 \times 10^{-2} R_s + 98.50} \quad (7)$$

ここに、

- ρ_d : 乾燥密度 [除荷状態] (Mg/m^3)
- p : 成型圧力 (MPa)
- R_s : ケイ砂混合率 (%)

なお、図-13からも分かるように、リバウンド率は乾燥密度、成型圧力によっても変化するものである。そこで、リバウンドに対して無補正とした場合および安全側のリバウンド予測式である式(3)に基づく補正をした場合についても計算し、図-16上に示した。領域中央の太線が式(7)に基づく關係、領域上端がリバウンド無補正、下端が安全側の補正を加えた場合の關係で、囲まれた領域を網掛けで示している。乾燥密度が高いほど、すなわち成型圧力が高いほど大きなリバウンドを生じることから、高い成型圧力を与えたグラフ右側では各領域の下端寄り、低い成型圧力を与えたグラフ左側では各領域の上端寄りの乾燥密度が、締め固めにより得られる密度ということになる。目標乾燥密度に対して必要な成型圧力・反力を推定

表-6 締固めに必要な成型圧力および反力

		目標乾燥密度(Mg/m ³)			
		1.6	1.7	1.8	1.9
Rs=30%	最適含水比(%)	20.6	18.0	15.3	12.4
	必要圧力(MPa)	1.5	3.4	7.8	19
	必要反力(MN)	6	14	32	76
Rs=50%	最適含水比(%)	22.6	17.6	16.3	13.2
	必要圧力(MPa)	0.33	1.7	2.6	7.4
	必要反力(MN)	1.4	6.8	11	30

原位置締固めにおける目標値 \uparrow
 ブロック方式における目標値 \uparrow

する場合、現実的な緩衝材の乾燥密度の範囲を考慮すると式(7)に基づく評価で問題ないと考えられるが、極端に低い乾燥密度もしくは高い乾燥密度を目標とする場合には注意が必要である。

c) 必要な成型圧力および反力の算定

ここでは、静的締固めによる緩衝材施工を行う場合に要求される必要圧力および反力について、式(7)に基づき試算を行った。使用ベントナイトはクニゲルV1、ケイ砂混合率は第2次とりまとめに基づきRs=30%とした。施工目標とする乾燥密度は、ブロック方式および原位置締固め方式による施工を想定し、1.9Mg/m³、1.6Mg/m³とした。締固めは、直径2260mmの円形断面(図-1の緩衝材仕様)にオーバーバック設置のためのクリアランス40mmを追加した寸法、受圧面積は4.0m²) に対して全断面で行うものとして計算を行った。締固めにおける必要圧力に対する寸法効果として、緩衝材の直径と厚さの比(H/D)が大きい方が必要圧力が増加する傾向が確認されているが¹²⁾、緩衝材施工厚さを仕上げりで10~30cm/層とすると、今回実施した試験に比べH/Dは小さくなる。したがって、必要圧力は減少し、式(7)により算定される圧力は安全側となることから、H/Dの影響は考慮しないものとした。また、(2)節c)項に示した、ケイ砂混合率の増加による締固め性の向上効果を確認するため、ケイ砂混合率をRs=50%としたケースも検討対象とした。

以上の条件で、締固めに必要な圧力および反力を計算した結果を表-6に示す。Rs=30%では、ブロック方式を想定した場合で76MN(7600tf)以上、原位置締固めを想定した場合で6MN(600tf)以上の反力確保が必要である。Rs=50%とすると、それぞれ30MN、1.4MNとなり、必要な反力は2/5~1/4以下にまで低減される。図-17に式(7)から求めたケイ砂混合率と得られる乾燥密度の関係を示すが、ケイ砂混合率の増加と乾燥密度の上昇はほぼ線形の関係にあり、ケイ砂混合率の増加による材料の締固め性の改善効果が大いことがわかる。原位置締固め方式による緩衝材施工では、坑道内での反力確保の困難性から動的締固めが検討されているが、締固め時の衝撃による周辺岩盤、廃棄体損傷の問題から衝撃影響、適用条件が限定されるため、必要反力の低減が可能であれば、静的締固めも有力な技術オプションとして位置付けるこ

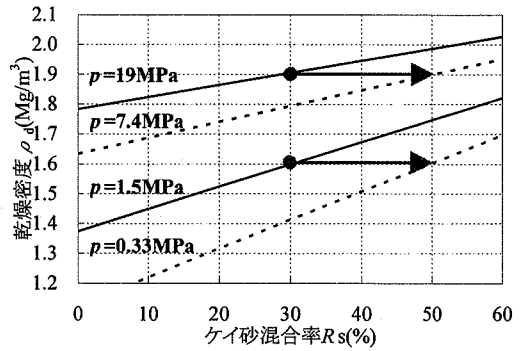


図-17 ケイ砂混合率Rsと乾燥密度ρ_dの関係

とができる。さらに、成型圧力の低減による締固め設備規模の縮小に加え、ケイ砂混合率の増加による緩衝材熱特性の向上およびそれに伴う廃棄体埋設間隔の縮小を図れる可能性もあり¹³⁾、処分費用の低減効果が期待できる。一方、ケイ砂混合率をRs=50%とした場合には、Rs=30%の場合に比べ、透水係数が10⁻¹³m/sオーダーから10⁻¹²m/sオーダーに上昇する¹⁴⁾。廃棄体周辺の拡散場の提供の観点からは十分に低い透水係数といえるが、膨潤圧、核種収着性の低下も生じるなど、人工バリアとしての性能は低下する。緩衝材のケイ砂混合率の増加は、施設・設備設計の観点で有効な合理化方策と考えられるが、処分サイトの特性等に応じて要求される人工バリア性能を確保できる範囲で、ケイ砂混合率を設定することが重要である。

3. 静的・動的締固め特性の比較

本章では、締固め方法(静的、動的)によるベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め特性の違いの観点から、材料の締固め機構について検討を行った結果を報告する。

(1) 動的締固め試験の方法

ここでは、ベントナイト・ケイ砂混合材料の静的・動的締固め特性の比較に資する動的締固め特性のデータ取得を目的に実施した試験の方法を示す。

試験は、異なるケイ砂混合率、含水比を与えた材料を対象に重錘落下による動的な締固めを行い、重錘落下回数(締固め回数)に対して得られる乾燥密度をデータとして取得し、結果を締固め曲線として整理した。試験で使用した材料の仕様を表-7に示した。材料のパラメータはケイ砂混合率Rsおよび含水比wで、ケイ砂混合率はRs=30%、50%の2ケース、含水比はw=5~21%の範囲でそれぞれ5ケースを設定した。締固めは図-18に示した試験装置を用いて行った。内径300mmの試験容器に、最大270kgの重錘(鋼製ウエイト)を任意の高さから落下

させる機構を持つ装置であり、重錘質量並びに落下高さを調整することにより、試験容器内の材料に対して任意の締固めエネルギーを与えることができる。与える締固めエネルギーは、別途実施した動的締固め試験の結果¹⁵⁾に基づき、緩衝材の目標乾燥密度の目安である $\rho_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$ 以上を得られる締固めエネルギーとして、 $R_s = 30\%$ のケースでは1打撃あたり $0.1E_c$ 、 $R_s = 50\%$ のケースでは $0.05E_c$ を設定した。なお、 E_c は”Standard Proctor”として規定される標準締固め仕事量を表し、 $1E_c = 5.51 \times 10^2 \text{ kJ/m}^3$ である¹⁶⁾。重錘を5回落下させるごとに供試体厚さから乾燥密度を測定し、最大25回の締固めを行った。締固めの層厚は仕上がりで 10cm /層とし、1層のみの締固めとした。なお、本試験では、実施工に近い締固めの条件としたことから、一般的なJIS A 1210で規定される突固めによる土の締固め試験とは条件が異なる。JIS A 1210の試験との大きな違いは、全断面の締固めであることおよび1層のみの締固めであること並びに重錘(ランマ)質量が非常に大きいことである。試験ケースを表-8に整理した。

(2) 試験結果および傾向分析

a) 試験結果

本試験により得られた締固め曲線と2章で取得した静的締固め試験における締固め曲線を比較したものを、図-19, 20に示す。

静的締固めと動的締固めの締固め曲線の比較を行う場

表-7 動的締固め試験の材料仕様

項目	仕様
ベントナイト	クニゲルV1
ケイ砂	3, 4(S,L), 5, 6, 7号ケイ砂混合 (乾燥質量比均等で混合)
ケイ砂混合率 R_s	30%, 50%
含水比 w	$R_s = 30\% : w = 7 \sim 21\%$ 5段階 $R_s = 50\% : w = 5 \sim 19\%$ 5段階
施工目標乾燥密度	$\rho_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$

表-8 動的締固め試験条件

ケース	ケイ砂混合率 R_s	含水比 w ()内は目標	締固めエネルギー
D1-1	30%	7.2% (7%)	$0.1E_c$ ^{※1} ×25回 ×1層 計 $2.5E_c$
D1-2		11.9% (11%)	
D1-3		14.0% (14%)	
D1-4		16.7% (17%)	
D1-5		21.4% (21%)	
D2-1	50%	5.5% (5%)	$0.05E_c$ ^{※2} ×25回 ×1層 計 $1.25E_c$
D2-2		9.4% (9%)	
D2-3		13.7% (13%)	
D2-4		16.1% (16%)	
D2-5		19.6% (19%)	
		※1 重錘 98.5kg 落下高さ 40.4cm	
		※2 重錘 98.5kg 落下高さ 20.2cm	

合、衝撃荷重と静的荷重の定量的な関係付けは困難である。これに対して吉田は、最大乾燥密度 ρ_{dmax} を揃えることで比較を行っており¹⁰⁾、本検討ではこれに倣い、同一材料を使った試験において、最大乾燥密度が比較的近い値となったケースの締固め曲線の比較を行うものとした。また、静的締固めについては、載荷状態での試験結果および式(4)を用いたリバウンドによる密度低下の補正を行った結果についてグラフ上に示した。凡例の末尾に”*”を示したものが、補正後の結果である。

b) 傾向の比較

図-19, 20から、締固め方法(静的、動的)による締固め特性の傾向の違いについて検討を行った。

材料の静的な締固め特性を示す点線と、動的な締固め特性を示す実線の曲線の形状を比較すると、全体的な傾向として、 $R_s = 30\%$ の材料については、締固め方法により締固め曲線の傾向が大きく異なっているのに対して、 $R_s = 50\%$ の材料については、比較的近い締固め曲線を示している。

$R_s = 30\%$ の材料についての締固め方法による最も顕著な違いは、乾燥側において静的締固めでは含水比の低下に伴い得られる乾燥密度が減少しているのに対し、動的締固めでは含水比の低下に伴う乾燥密度の減少がみられない点である。また、動的締固めでは、含水比 $w = 12 \sim 14\%$ 付近で乾燥密度が急激に変化する領域がみられる。一方、 $R_s = 50\%$ の材料についても、動的締固めの方が含水比低下に伴う乾燥密度低下の程度が小さい傾向は読みとることができるが、 $R_s = 30\%$ の材料に比べ、その傾向は顕著ではない。

c) 一般的な土質材料との傾向の比較

ここで、一般の土質材料を対象とした締固め方法による締固め特性の違いの傾向との比較の観点から、ベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め特性について検討を行った。

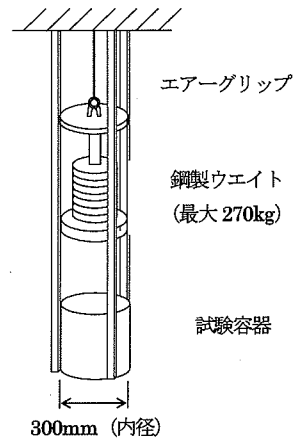


図-18 動的締固め試験装置

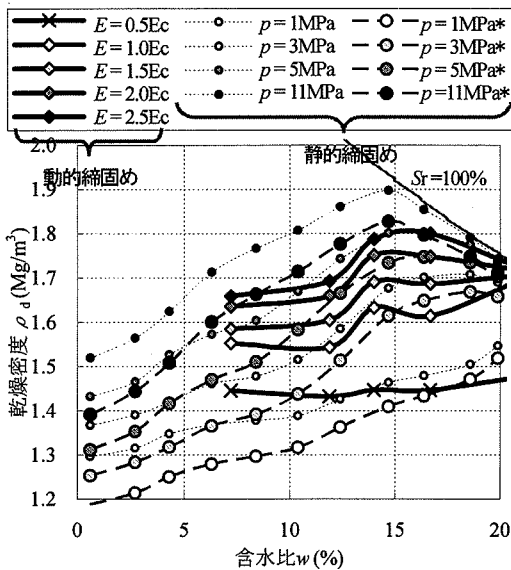


図-19 締固め曲線の比較 (Rs=30%)

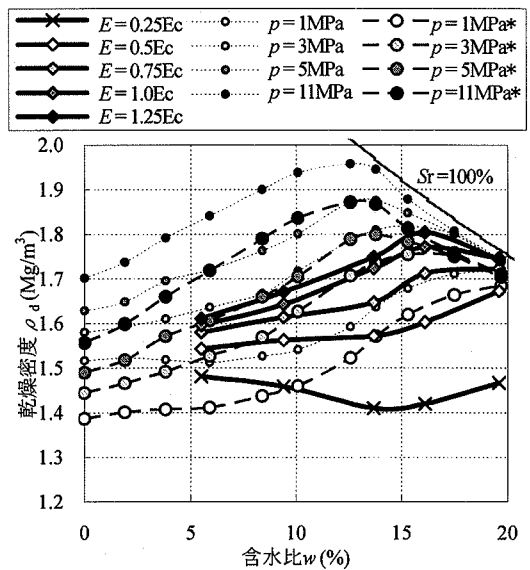


図-20 締固め曲線の比較 (Rs=50%)

吉田は、火山泥流、褐色森林土、湖底土を対象に締固め方法による締固め機構の違いについて検討を実施し、その結果、静的締固めに対する動的締固めの特徴として下記の3つ挙げている¹⁰⁾。

- ① 最適含水比よりも湿潤側で到達する飽和度が低い (ゼロ空気間隙曲線に沿う領域での空隙量が多い)
- ② 最適含水比が低含水比側にずれる
- ③ 最適含水比より低い領域では密度が高い

吉田は、これらの傾向が現れる原因として、①②については動的締固めが衝撃力による締固めであることによる湿潤状態での封入空気の解放の困難性を、③については乾燥側での硬い粒子の破碎に伴う粒子の微細化の進行による締固め性の向上を挙げている。

③については、本試験結果においても、その傾向が明確に現れている。前章のベントナイト種類による締固め特性の比較でも述べたが、乾燥側では一般の土質材料に近い締固め特性を示しており、衝撃による団粒破碎を伴う粒子再配置が締固めにおいて有効に機能しているものと推測される。Rs=50%の材料は、③の傾向がRs=30%の材料に比べ小さいが、これは1打撃あたりの締固めエネルギーが1/2であることから、衝撃による団粒破碎および粒子再配置の効果がRs=30%の材料に比べ小さいためであろう。

一方、本試験の結果から①②の傾向については確認できない。ブロック方式による緩衝材施工のハンドリング技術として真空吸着パッドを用いた把持技術が検討¹¹⁾されていることから分かるように、高密度に締固められ

たベントナイト・ケイ砂混合材料はきわめて低い透気性を示すことから、締固め方法の違いによる封入空気の開放性の差が生じにくく、そのため、①②の傾向が現れなかったものと推測される。締固められた供試体の透気性を考慮すると、供試体からの空気排出は容易ではなく、静的、動的締固めともに、次章で述べる粒子粘結により強い粒子間結合力が発現し、それにより材料内に空気が圧入された状態で締固めが進行しているものと考えられる。

d) 締固め方法に対する緩衝材施工の観点からの考察

前項までの検討をまとめると、締固め方法による締固め特性の違いは、動的締固めを行った場合に乾燥側で良好な締固め性を有することおよび乾燥密度が急激に変化する含水比領域がみられることである。

施工性を考慮すると目標乾燥密度に対して締固め性の良いw=15~20%の含水比が合理的であり、この含水比範囲については締固め方法の違いによる締固め特性の差は小さい。これよりやや乾燥側に、動的締固めにおいて急激に締固め性が変化する含水比領域が確認されており、施工管理方法の検討を行う場合に留意する必要がある。

一方、例えば材料の調湿工程を省略した自然含水比(クニゲルV1の場合でw=5~7%程度)のままの材料を用いるなど、低い含水比の材料を用いて施工を行う場合には、乾燥側での締固めの含水比依存性の小さい動的締固めの方が、好ましい特徴を有しているといえる。ただし、衝撃による周辺岩盤損傷等の問題から与えられるエネルギーについて制限を受ける原位置での動的締固めでは、施工性を優先した最適含水比前後の含水比設定が望ましく、現実的には低い含水比の材料に対する動的締固めの適用

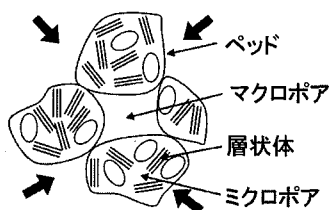


図-21 団粒(ペッド)の基本単位

性は低いといえる。締固めの含水比依存性は高いものの、与えられる成型圧力の自由度の高い静的締固めの方が、幅広い仕様の材料の締固めに対応することが可能である。

4. 締固め時の粒子挙動メカニズム

ここでは、走査型電子顕微鏡(SEM)により、締固めたベントナイト・ケイ砂混合材料の断面を観察することで締固め後の粒子状態の確認を行い、粒子挙動メカニズムの観点から締固めに対する影響因子、留意事項について検討を行った。

(1) 電子顕微鏡による締固め後の粒子状態の観察

初めに、SEMによる観察の倍率設定を行うため、観察の対象とする粒子のスケールについて整理を行う。表-9に、粘土の団粒(ペッド)および間隙(ポア)の区分、図-21にペッドの基本単位概念を示す¹⁷⁾。ベントナイトの団粒は、モンモリロナイト層状体、随伴鉱物、間隙から構成され、団粒内部は安定状態が形成されている。団粒間は機械的な力が作用し、団粒の破碎、変形は、外部からの力により、団粒内の粒子の物理化学的な結合が解かれることで生じるものと考えられる。水分供給に伴う団粒内部の状態変化は、団粒の特性変化として捉えるものとし、締固め時の団粒の挙動に着目して観察を行うものとした。観察の対象とする団粒は、画像上で識別が比較的容易なマクロペッド(>50 μm)~メゾペッド(2~50 μm)とし、それぞれ倍率を200倍、5000倍に設定した。

SEM観察の対象とした供試体の仕様を表-10に示す。観察面は、ハンマーで供試体の一部を欠損させた断面部である。SEMによる観察面の画像を図-22~29に示した。

まず、低密度に締固めた供試体の粒子状態を示した図-23を見ると、空隙が多く存在し、中央にベントナイトに覆われたケイ砂粒子と思われる粒子が確認できる。締固め前の粉末材料である図-22にみられる微細な粒子はほとんど確認できないが、中央の粒子表面の凹凸から団粒の付着が認められる。次に、高密度に締固めた供試体を示した図-24であるが、右端に空隙が確認されるものの、全体が結合し均質な状態となっている。非常に高密度に締固めた供試体を示した図-25については、さらに均質化

表-9 スケールによる粘土のペッド、ポアの区分

ペッド(団粒)		ポア(空隙)	
寸法	名称	寸法	名称
>50 μm	マクロペッド	>10 μm	マクロポア
2~50 μm	メゾペッド	1~10 μm	メゾポア
0.1~2 μm	マイクロペッド	0.01~1 μm	マイクロポア
<0.1 μm	サブマイクロペッド	<0.01 μm	サブマイクロポア

表-10 SEM観察に供した材料仕様

材料名	供試体の状態
I 粉末材料	粉末状態の材料(締固め前)
II 成型体-1	$\rho_d = 1.39\text{Mg/m}^3$ (低密度に締固め)
III 成型体-2	$\rho_d = 1.79\text{Mg/m}^3$ (高密度に締固め)
IV 成型体-3	$\rho_d = 1.95\text{Mg/m}^3$ (非常に高密度に締固め)
供試体の共通仕様	
使用材料	クニゲルV1 70% + ケイ砂 30%
含水比	w = 15%
締固め方法	図-18の装置による動的締固め(成型体)

が進み、画像からは目立った空隙をほとんど確認できない。

5000倍に拡大した図-26~29の粒子状態であるが、密度上昇に伴う空隙の減少が確認できる。また表面にモンモリロナイト結晶層とみられるシートが確認できるが、その配列に規則性はみられない。

(2) 粒子挙動の観点からの締固めに関する考察

これらのSEM画像からは、200倍、5000倍いずれも締固め前もしくは低密度の状態においてはベントナイトおよびケイ砂とみられる粒子が確認できるが、高密度に締固められた状態では粒子・団粒を確認できない。材料全体が結合・均質化することで締固めが進行しているように見ることができる。モンモリロナイトは、水分を加えると負に帯電した結晶層間に存在する交換性陽イオン(Na型ベントナイトの場合は Na^+)が水和することで結晶層間に水分を取り込み、膨潤・ゲル化する。ゲル化したモンモリロナイトは加圧すると結晶層面の結合力が増し、強い粘結作用を発揮することが知られている¹⁸⁾。締固めに伴い材料全体の均質化が進むのは、周辺が膨潤したベントナイトの団粒が加圧されることで団粒同士が結合し、また、団粒の破碎、変形およびゲルの移動による空隙充填により均質化することで締固めが進行しているものと考えられる(図-30)。高密度に締固められたベントナイト・ケイ砂混合材料は、土質材料としてはきわめて高い強度特性(例えば $\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$, $R_s = 30\%$, $w = 12\%$ の場合、一軸圧縮強度 $q_u = 1111\text{kN/m}^2$, 引張強度 $\sigma_t = 82\text{kN/m}^2$)¹⁹⁾を示すが、これは、通常の土質材料とは異なり、粒子間が強力に結合されていることを示すものである。

以上のとおり、締固めたベントナイトの粒子の状態からは、締固めにおいてモンモリロナイトの粘結作用が非常に重要な現象であり、ある程度の密度まで締固められ

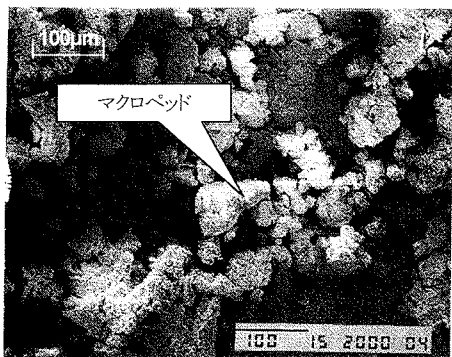


図-22 ベントナイト・ケイ砂混合材料 (粉末 200倍)

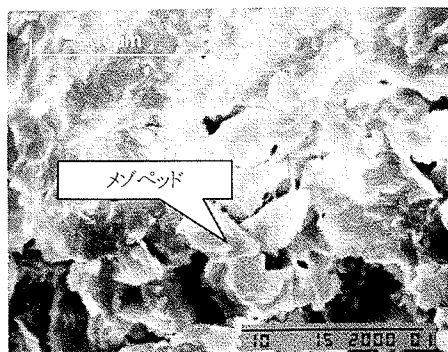


図-26 ベントナイト・ケイ砂混合材料 (粉末 5000倍)

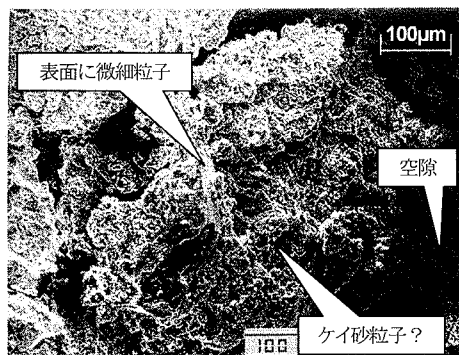


図-23 粒子の状態 (成型体-1 : $\rho_d=1.39\text{Mg/m}^3$ 200倍)

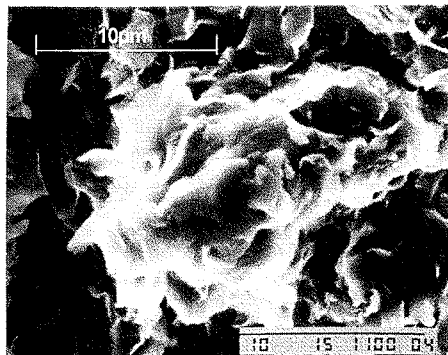


図-27 粒子の状態 (成型体-1 : $\rho_d=1.39\text{Mg/m}^3$ 5000倍)

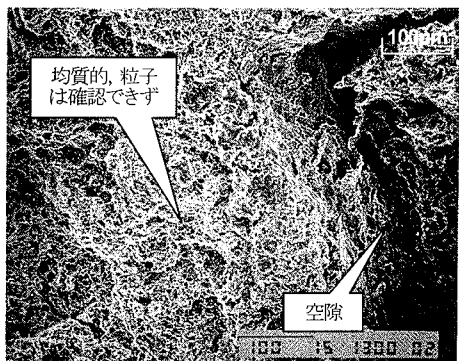


図-24 粒子の状態 (成型体-2 : $\rho_d=1.79\text{Mg/m}^3$ 200倍)

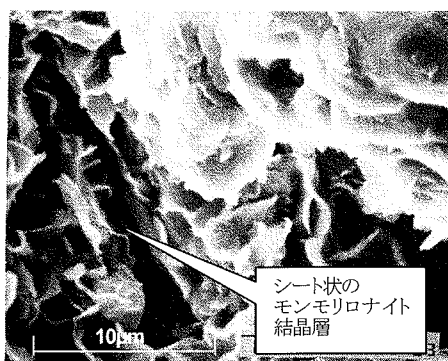


図-28 粒子の状態 (成型体-2 : $\rho_d=1.79\text{Mg/m}^3$ 5000倍)

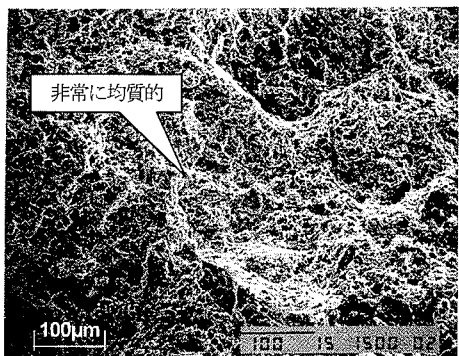


図-25 粒子の状態 (成型体-3 : $\rho_d=1.95\text{Mg/m}^3$ 200倍)

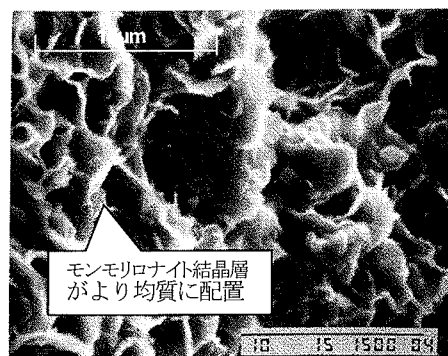


図-29 粒子の状態 (成型体-3 : $\rho_d=1.95\text{Mg/m}^3$ 5000倍)

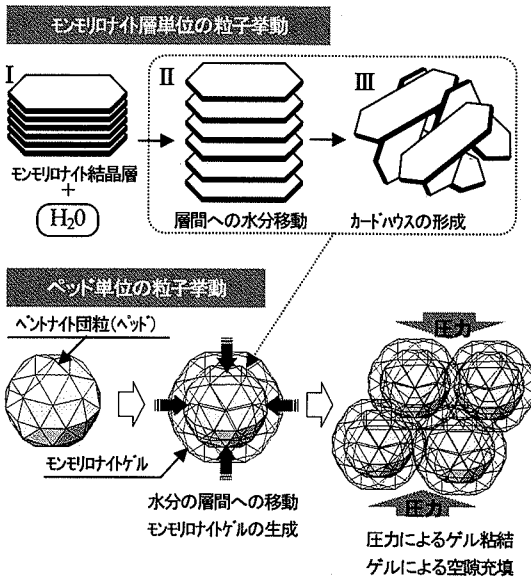


図-30 締固め時のモンモリロナイトの粒子挙動

た状態の材料については、粒子の粘結状態および粘結した粒子塊の変形・破壊特性が材料の締固め特性に対して大きく影響していると考えられる。

モンモリロナイトの粘結が、材料の締固め機構に影響しているものとする、モンモリロナイトゲルの生成状態、すなわちモンモリロナイトの水分状態によって締固め性が変化するはずである。これを示す事例として、調湿からの養生期間による締固め特性の変化が確認されていることが挙げられる²⁰⁾。筆者らが実施した、材料の調湿からの養生時間をパラメータとした、JISA 1210に基づく予備的な締固め試験の結果を図-31に示す。ケイ砂混合率、含水比、締固めエネルギーをパラメータとして、材料の調湿から最大14日間養生させ、養生時間と得られる乾燥密度の関係について試験により確認したものである。同一仕様の材料でも、調湿直後は締固め性が明らかに悪く、時間経過とともに改善され、1日程度経過すると得られる乾燥密度がほぼ安定することが分かる。養生時間によって得られる乾燥密度が最大 0.1Mg/m^3 程度変化しており、その影響は小さくない。時間経過による材料内での変化としては、調湿直後は団粒表面、粒子間に偏って存在する水分が、モンモリロナイト結晶層の持つポテンシャルの差により乾燥状態にある層間に移動し、材料内で水分が均質に配分されることが考えられる。モンモリロナイトへの水分の供給状態、つまりゲルの生成状態によって締固め性が変化しているものと考えられる。湿潤状態にあるベントナイト・ケイ砂混合材料の締固めでは、単純な含水比管理だけではなく、モンモリロナイトと含有水分量の比、養生期間など、モンモリロ

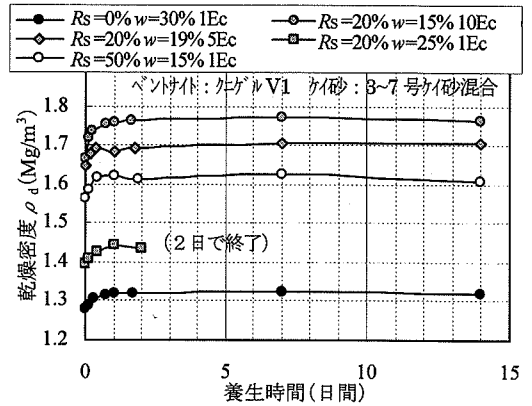


図-31 養生期間が締固めに及ぼす影響

ナイトの水分状態に影響を及ぼす因子についての管理の必要性も示唆されているといえる。なお、図-31の結果からは、緩衝材の施工において安定した締固め性を得るためには、調湿後1日以上養生した材料を用いることが望ましいといえる。本研究で用いた材料は、すべて1日以上養生したものである。

(3) 粒子挙動メカニズムと締固め特性の評価指標

ベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め時の粒子挙動メカニズムについて、本研究で実施した一連の検討を通じ、下記のとおり考察できる。

乾燥側では、水分供給に伴うモンモリロナイトゲル生成等ベントナイト特有の挙動が生じにくく、団粒破碎を伴う粒子再配置が締固めにおいて重要な挙動であると考えられる。団粒破碎による粒度分布改善の効果が得られやすい顆粒状のMX-80が乾燥側でクニゲルV1よりも良好な締固め特性を示したこと並びに団粒の破壊が生じやすい動的締固めにおいて、乾燥側での締固め性の低下の程度が小さいことなどは、乾燥側での締固め機構が一般の土質材料に近いものであることを示しているといえる。乾燥側の締固めでは、材料の粒度分布や団粒の強度が材料の締固め性を左右する重要な因子であると考えられ、これらに留意した材料設計、施工管理が必要であると考えられる。

一方、湿潤側では、モンモリロナイトのゲル化、粘結等ベントナイト特有の粒子挙動が締固めメカニズムに大きく影響してくるものと考えられ、乾燥側の締固めにおける管理項目に加え、モンモリロナイトの水分状態(モンモリロナイトに供給される水分量、材料混合・調湿からの養生時間等)の管理も重要である。湿潤側において、粘結したモンモリロナイトの変形性、流動性が材料の締固め特性を決定する重要な因子であると考えられると、小峯らの提案による塑性限界 w_p を用いた評価²⁾に代表されるような、水分が与えられたモンモリロナイトの物理特

性を考慮できる指標による評価が有効である。

なお、乾燥側、湿潤側の境界は明確なものではなく、一般の土木材料的な粒子挙動と粘土特有の粒子挙動は同時に起こりうるものであり、与えた含水比領域においてどちらの挙動が締固め特性に対して強く影響するかが問題である。粒子挙動メカニズムに応じた適切な評価指標を導入することが重要である。

5. 結論

本研究により得られた主な知見を下記に整理する。

- ・緩衝材の含水比、ケイ砂混合率および成型圧力と得られる乾燥密度の関係の明確化を行った。静的締固めにおける成型圧力 p およびケイ砂混合率 R_s から得られる乾燥密度 ρ_d を予測する実験式(7)を提案した。式(7)により、材料仕様並びに目標乾燥密度から必要な成型圧力を推定することができる。
- ・緩衝材の主要な仕様項目（含水比、ケイ砂混合率、使用ベントナイト）と締固め特性の関係の明確化を行った。ケイ砂混合率を増加させることで、同じ乾燥密度を得るために必要な成型圧力の大幅な低減が可能であり、施工性の向上には有効である。
- ・MX-80は、クニゲルVIに比べ含水比変化に伴う締固め性の変化の少ない含水比依存性の低い締固め特性を有している。水分増加に対する物理特性の変化の感度が鈍いため湿潤側での締固め性は劣るが、乾燥側では良好な締固め性を発揮する材料特性を有する。
- ・電子顕微鏡による締固めた供試体の粒子状態の観察を行い、高密度に締固められた状態の緩衝材は、粒子全体が結合・均質化した状態となっていることを確認した。ケイ砂・ベントナイト未膨潤領域を骨材とし、ゲル化したモンモリロナイトの粘結および変形による空隙充填により締固めが進んでいると考えられる。
- ・乾燥側では、団粒破碎を伴う粒子再配置による一般の土質材料に近い締固め機構を示し、一方、湿潤側ではモンモリロナイトのゲル化、粘結等ベントナイト特有の挙動が締固め機構に大きく影響すると考えられる。締固め特性を評価する上で、乾燥側では粒度分布、粒子破壊性等の一般の土質材料と同様の指標が重要であり、一方、湿潤側では小峯らの提案による塑性限界 w_p を用いた評価に代表されるようなモンモリロナイトの水分状態を考慮できる指標による評価が必要と考えられる。

本成果は合理的な緩衝材施工システムの構築、緩衝材

仕様設計並びに品質管理方法の構築に対して有益な知見となるものと考えられる。

なお、本論文は経済産業省「高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査・遠隔操作技術高度化調査」で得られた試験データを再整理し、緩衝材仕様と締固め特性の関係およびベントナイト・ケイ砂混合材の締固め機構の観点から追加試験、検討を行い取り纏めたものである。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ一分冊2, 4.1.3 人工バリア仕様, p.IV-199, 2000.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ一分冊2, 4.1.2.3.2 緩衝材の製作施工方法, pp.IV-170~IV-189, 2000.
- 3) Awano, T., Kanno, T., Ueda, H. and Kimoto, T.: Emplacement Technique of Monolithic Buffer Material, *DisTec2000*, pp.153~158, 2000.
- 4) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ一分冊2, 4.1.2.1.3 締固め特性, pp.IV-77~IV-80, 2000.
- 5) 小峯秀雄, 緒方信英：膨潤性土質材料の物理的性質と締固め特性, 電力中央研究所報告書, U90024, 1990.
- 6) 日本ベントナイト工業会：日本ベントナイト工業会標準試験法, ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法, JBAS-107-77, 1977.
- 7) 小峯秀雄, 緒方信英：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案, 土木学会論文集, No.436/III-16, pp.103~110, 1991.
- 8) 核燃料サイクル開発機構：ベントナイトの基本特性調査, 6-3-2 機械的特性, pp.66~71, 1989.
- 9) 竹内真司, 原啓二, 中野政詩：圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤工学会論文報告集, vol.35, No.3, pp.129-137, 1995.
- 10) 吉田力：土の締固め機構とその効果に関する研究, 第二章 土の締固め曲線の諸形態, 第三章 土の締固めによる団粒の変化, 山形大学紀要(農学), 第10巻, 第2号, pp.413~454, 1987.
- 11) 原子力環境整備促進・資金管理センター：遠隔操作技術高度化調査, 3.4.1 ブロック型緩衝材搬送技術に関する研究, pp.3-269~438, 2002.
- 12) 増田良一, 竹ヶ原竜大, 高尾肇, 上坂文哉, 宇津野二士：ベントナイトブロック寸法と製作性に関する実験的検討, 第58回土木学会年次講演会, CS7-015, 2003.

- 13) 増田良一, 小野文彦, 雨宮清, 千々松正和: ベントナイト系緩衝材の仕様と熱伝導率の関係, 日本原子力学会2004年春の年会, 第III分冊, p.829, 2004.
- 14) 出口朗, 小野文彦, 雨宮清, 今井久, Oanh, T.D.P.: 緩衝材原位置締固め工法の検討—透水試験—, 第56回土木学会年次講演会, CS1-007, 2001.
- 15) 小野文彦, 増田良一, Oanh, T.D.P., 雨宮清: 緩衝材原位置締固め工法の検討—締固めエネルギーに関する一考察—, 第55回土木学会年次講演会, CS-192, 2000.
- 16) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), 第5編 安定化試験, pp.252~263, 2000. (2003. 8. 28受付)
- 17) 土壤物理学研究会: 土の物質学—土質工学の基礎—, 4章 土の構造, pp.72~96, 森北出版, 1979.
- 18) 日本粘土学会: 粘土ハンドブック第二版, III.応用編 3.12 鋳物用粘土, pp.957~971, 1987.
- 19) 原子力環境整備促進・資金管理センター: 遠隔操作技術高度化調査, 3.1.2 (5) ブロックの力学的安定性検討, pp.3-200~3-207, 2003.
- 20) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—分冊2, 4.1.2.3.1 製作施工実績, pp.IV-157~169, 2000.

STUDY ON THE INFLUENCE OF A SPECIFICATION OF BUFFER MATERIAL ON THE COMPACTION CHARACTERISTICS

Ryoichi MASUDA, Kiyoshi AMEMIYA, Masakazu CHIJIMATSU,
Kakuichiro ADACHI and Hideo KOMINE

In order to build up the construction technology of buffer for geological disposal of radioactive waste, it is necessary to investigate the compaction characteristics of mixture material of bentonite and silica sand. From the results of static compaction experiment, relation between specifications of buffer and compaction characteristic was investigated. And the particle action mechanism during compaction was investigated by comparison between dynamic compaction and static compaction, and by microscopic observation. As results, the influence factors on compaction characteristics of buffer material are shown from the viewpoint of particle action mechanism.