

# ベントナイト系緩衝材の 締固めエネルギーに着目した動的締固め特性

増田良一<sup>1</sup>・朝野英一<sup>2</sup>・雨宮清<sup>3</sup>・千々松正和<sup>4</sup>・足立格一郎<sup>5</sup>・小峯秀雄<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電力(株) 原子力技術部 (〒100-0002 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

E-mail: masuda.ryouichi@tepcoco.jp

<sup>2</sup>工修 (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-8-10)

<sup>3</sup>正会員 学術博 (株) 間組 技術・環境本部 (〒107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>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)

<sup>6</sup>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数万年以上に亘る長期的な安全性を確保する上で、人工バリアの性能・品質に係わる緩衝材の施工技術の開発は重要である。緩衝材の原位置締固め工法は、処分原位置でベントナイト・ケイ砂混合材料の締固めを行う施工技術であるが、本工法では材料の締固め特性を把握し、適切な締固め方法および締固めエネルギーの設定を行う必要がある。本報告は、ベントナイト・ケイ砂混合材料に与える締固めエネルギーと得られる乾燥密度の関係および施工スケールによる差異に着目し、室内、実規模の2つのスケールでの締固め試験並びにその結果に基づくベントナイト・ケイ砂混合材料の動的締固め特性の検討を行った成果について報告するものである。

**Key Words :** bentonite, dynamic compaction characteristics, in-situ compaction method, compaction energy, high level radioactive waste disposal

## 1. はじめに

原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物の処分は、解決しなければならない問題である。使用済み燃料の再処理により発生する高レベル放射性廃棄物は、地下数百mの岩盤中に埋設する地層処分が計画されている。地層処分では、岩盤の持つ低透水性、核種の収着性等により核種移行を遅延する「天然バリア」および人工的な複数の障壁である「人工バリア」から構成される「多重バリアシステム」により、数万年以上に亘り人間の生活圏への影響を抑制する<sup>1)</sup>。緩衝材は、廃棄体周辺に構築されるベントナイトを主体としたケイ砂混合材料(以下、ベントナイト・ケイ砂混合材料と称する)を用いた人工バリアのひとつである。緩衝材が人工バリアとして設計どおりの機能を発揮するためには、要求される仕様・品質の緩衝材を確実に構築できる施工技術の開発が必要である。

現在、緩衝材の施工技術については、ベントナイトブロック方式<sup>2)</sup>、一体型緩衝材方式<sup>3)</sup>、原位置締固め工法、ペレット充填方式<sup>4)5)</sup>等の開発が進められている。このうち、原位置締固め工法は、処分原位置において材料の

締固めを行う土質材料の締固め技術を背景に持つ施工技術であり、岩盤と密着した、均質性の高い緩衝材の施工が可能であるなどの特徴を有する。

原位置締固め工法では、放射性廃棄物が共存する空間で材料の締固めを行うため、遠隔操作による施工が要求される可能性があり、複雑な施工管理を必要としない施工システムの構築が望ましい。また、本工法における材料の締固め方法としては、坑道内での反力確保の必要がない動的な締固めが有力であると考えられるが、動的締固め時の衝撃による周辺岩盤の損傷も懸念され、過大な締固めエネルギーの設定は、施工時の安全性の低下に繋がる場合もある<sup>6)</sup>。そのため、施工システムの構築にあたっては、確実に所定の仕様・品質の緩衝材が構築可能な、適切かつ合理的な締固め方法および締固めエネルギーの設定が重要であり、材料であるベントナイト・ケイ砂混合材料の動的な締固め特性の把握、とりわけ締固めエネルギーと得られる乾燥密度の関係の明確化は不可欠な知見である。

原位置締固め工法を土質材料の締固め技術として見た場合、土質材料の締固め技術は道路路盤・路床施工をは

じめ様々な分野で利用されることから研究の歴史は古く、膨大なデータおよび知見が蓄積されている。しかし、水分量の増減による材料特性の変化が著しいベントナイトを土木工事の材料として使用する例は少なく、また、膨潤性、粘結性等の特殊な性質を有することから、一般の土質材料を対象にした既往の知見の適用性は不明瞭である。一方、ベントナイト・ケイ砂混合材料を対象とした動的締固め特性に関する検討については、釜石試験場においてベントナイト・ケイ砂混合材料をランマおよびタンパで施工した例<sup>7)</sup>があるが、締固め特性の把握を目的に実施した試験ではなく、動的締固め特性に関する十分な知見は得られていない。

本報告は、ベントナイト・ケイ砂混合材料に与える締固めエネルギーと得られる乾燥密度の関係および施工スケールによる締固め特性の差異に着目し、室内、実規模の2つの異なるスケールでの締固め試験を行い、その結果に基づき、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した結果を報告するものである。

## 2. 試験条件

### (1) 施工目標とする緩衝材仕様

緩衝材の設計要件は処分サイトの地質環境に依存するものも含まれることから、現時点において緩衝材の仕様は決定していない。これまで、核燃料サイクル開発機構や電気事業連合会により緩衝材の試設計が行われているが<sup>8),9)</sup>、本検討では核燃料サイクル開発機構により例示された緩衝材仕様を現時点における標準的な緩衝材仕様と考え、その仕様に準じた緩衝材を施工目標として設定した。核燃料サイクル開発機構による緩衝材仕様および

表-1 緩衝材の仕様設計例

項目	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	1.6Mg/m <sup>3</sup>
緩衝材厚さ	70cm

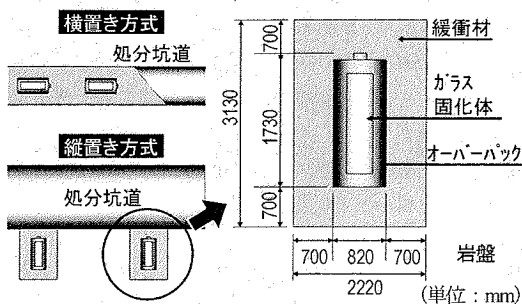


図-1 人工バリアのレイアウト設計例

レイアウトの設計例を表-1および図-1に示す。本検討では縦置き方式のレイアウトの緩衝材の施工を前提とする。緩衝材の乾燥密度については、要求仕様は $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ であるが、確実に所定のバリア性能を確保するため、より高い密度を施工管理上の目標密度とする場合も想定し、 $\rho_d=1.6\sim 1.8\text{Mg/m}^3$ を本検討での施工目標とした。

### (2) 原位置締固め工法の施工手順

原位置締固め工法の施工手順については、締固めの方法や廃棄体挿入孔の構築方法により、いくつかの方式が検討されている<sup>10)</sup>。本検討で実施した締固め試験では、図-2に示す施工手順を前提とした。

本検討で行う試験における締固めの方法については、比較的大きな締固めエネルギーを与えることのできる重錘落下による動的締固めを選択した。なお、本工法では静的に締固めを行う方法も考えられるが、目標とした仕様の緩衝材の締固めに必要な圧力は約3MPa<sup>11)</sup>であり、全断面(面積約4m<sup>2</sup>)で締固めを行う場合に確保すべき反力は10MN以上となる。坑道内での反力確保は容易ではないことから、静的締固めについては検討対象外とした。静的締固めについては、締固め性の高い材料を用いる場合など、必要とする締固め圧力の低減が可能な場合に適用が可能な技術オプションとして位置付けられる。

### (3) 試験に用いる材料

本検討で実施した試験に用いた材料の仕様を表-2に示す。ベントナイトは我が国の放射性廃棄物処分分野の研究において利用実績の多い山形県月布産のNa型ベントナイトであるクニゲルV1を用いるものとした。ベントナイトは、試験時期により異なる2つの製造ロットのものを用いている。製造ロットによりモンモリロナイト含有量が異なっていたことから、それぞれのベントナイトを使用した材料を、材料I、材料IIとして区分するものとした。材料I、材料IIに使用したベントナイトのモンモリロナイト含有率は、クニピアF(モンモリロナイト含有量ほぼ100%<sup>12)</sup>)とのメチレンブルー吸着量測定試験<sup>13)</sup>の結果の比較から、それぞれ51%、59%であった。

ケイ砂については、3,4(S,L),5,6,7号ケイ砂を乾燥質量

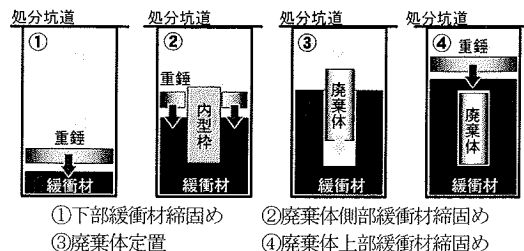


図-2 原位置締固め工法の施工手順例

比で均等に混合したものを使用するものとし、ケイ砂混合率(以降Rsで示す)は表-1の仕様に従いRs=30%とした。なお、ケイ砂混合率Rs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。

含水比については、事前に実施したJIS A 1210に基づく締固め試験の結果を参考に設定した。図-3に締固め試験の結果を示す。今回実施する試験とは締固めの方法が異なることから得られる締固め特性は厳密には同じではないが、JIS A 1210の締固め試験で得られた締固め曲線において、施工目標とする乾燥密度が最大乾燥密度として得られた時の最適含水比が良好な締固め性を得られる含水比の目安になるものと考え、その時の最適含水比を材料の含水比として与えるものとした。最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ が1.8Mg/m<sup>3</sup>程度となったのは締固めエネルギー5Ec~10Ecの締固め曲線であり、それらの曲線の最適含水比となる $w = 15 \sim 16\%$ を試験に用いる材料の含水比とした。なお、Ecは“Standard Proctor”として規定される標準締固め仕事量を表し、1Ec=5.51×10<sup>2</sup>kJ/m<sup>3</sup>である<sup>19)</sup>。

また、ベントナイトは材料の混合・調湿からの養生時間が短い場合に、材料の品質が安定せず締固めにより得られる乾燥密度にばらつきが生じることが確認されている<sup>8)</sup>。このことから、試験では混合・調湿から24時間以上養生した材料を使用するものとした。

#### (4) 締固めエネルギーの設定

本検討で実施した締固め試験は重錘落下式の動的締固めによるものであり、締固めエネルギーは重錘質量、落下高さ、締固め回数で決定される。試験では1打撃あたりの締固めエネルギー（以下、打撃エネルギー $E_{imp}$ と称す）をパラメータとしており、重錘質量および落下高さを調整することで設定した打撃エネルギー $E_{imp}$ を材料に与えている。積算した締固めエネルギー（以下、総締固めエネルギー $E_{ad}$ と称す）は、打撃エネルギー $E_{imp}$ に締固め回数を乗じた値となる。

打撃エネルギー $E_{imp}$ は式(1)により導かれる。

$$E_{imp} = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{0.0551V} = \frac{m_f \cdot H}{5.625V} \quad (1)$$

ここに、

- $E_{imp}$  : 打撃エネルギー (Ec)
- $W_R$  : ランマ重量 (kN)
- $H$  : 落下高さ (cm)
- $N_B$  : 層当たりの突固め回数  
( $E_{imp}$ を計算する場合には $N_B=1$ 回)
- $N_L$  : 層数 ( $E_{imp}$ を計算する場合には $N_L=1$ 層)
- $m_f$  : 重錘質量 (kg)
- $V$  : 締固め材料体積 (cm<sup>3</sup>)

なお、式(1)において、落下高さ $H$ および締固め材料体積 $V$ は、締固めにより層厚が薄くなることで変化するが、ここで代入する値は打撃エネルギー $E_{imp}$ が最大となる締固め終了時（仕上がり時）の値とした。

また、同じ打撃エネルギーを与える場合でも、重錘質量と落下高さは多様な組み合わせを取りうるが、その組み合わせにより材料への衝撃の作用状態が変化し、試験で得られる材料の締固め特性が変化する可能性がある。ここで、3章の室内締固め試験で用いる試験装置による重錘質量、落下高さを変えた同一打撃エネルギーでの予備締固め試験を実施し、重錘質量、落下高さの組み合わせによる材料の締固め特性の変化について確認を行った。試験結果を図-4に示す。打撃エネルギーは $E_{imp}=0.2Ec$ で一定とし、重錘質量38.6~151.1kg、落下高さ53.3~208.8cmの範囲で組み合わせたE1~E3の3ケースについて試験を実施したが、落下高さの高いE3のケースでわずかに乾燥密度が低くなっているものの、ケースによる締固め特性の差はほとんど生じていない。落下高さが高いケースでわずかに乾燥密度が低いのは、空気抵抗によるエネルギー損失が大きいためであると考えられる。この結果から、落下高さが極端に高い場合を除き、重錘質量、落下高さの組み合わせによる締固め特性の差はごく

表-2 使用した材料の仕様

項目	材料I	材料II
ベントナ 種類	クニゲルV1 モンモロロナ含有率51% <sup>**</sup>	クニゲルV1 モンモロロナ含有率59% <sup>**</sup>
ケイ砂 種類	3,4(S,L),5,6,7号ケイ砂 乾燥質量比均等配合	同左
ケイ砂 混合率	Rs=30%	同左
含水比	w=16%	w=15%
養生時間	材料混合・調湿後 24時間以上養生	同左

<sup>\*\*</sup>MB吸着量<sup>19)</sup>のクニゲルV1(モンモロロナ100%)との比から計算

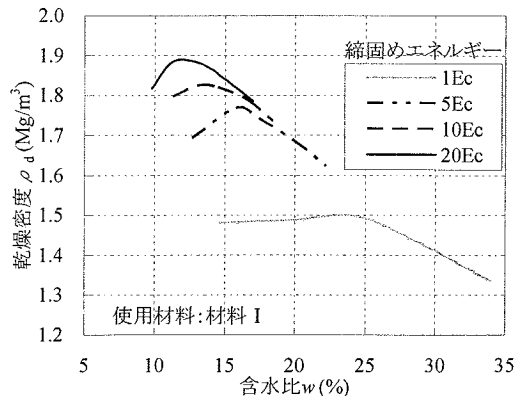


図-3 JIS A 1210に基づく締固め試験結果

小さく、その組み合わせによらず打撃エネルギーによる縮固め特性の評価を行って問題ないものと考えられる。

### 3. φ300mm落下縮固め試験

#### (1) 試験の目的

ここでは、ベントナイト・ケイ砂混合材料を対象とした縮固めエネルギーと縮固めにより得られる乾燥密度の関係の明確化を目的に、内径300mmの縮固め容器を用いた重錘落下による室内縮固め試験を実施し、打撃エネルギーおよび総縮固めエネルギー並びに縮固めにより得られる乾燥密度の関係について、傾向の把握と関係の定式化を行った。

#### (2) 試験方法

試験に用いた縮固め装置の概要を図-5に、縮固め容器の構造を図-6に示した。試験装置は鋼製重錘をエアグリップで把持し、所定の高さから落下させる機構を持ち、下部の縮固め容器内に投入した材料を鋼製重錘の自由落下により縮固める。容器は内径300mm、深さ400mmの金属製であり、2分割して供試体を取り出せる機能を有する。

試験は打撃エネルギー $E_{imp}$ をパラメータとし、1回の重錘落下による層厚の変形量が0.2mm以下になるまで所定の打撃エネルギーで繰り返し縮固めを行い、与えたエネルギーと得られた乾燥密度の関係およびその打撃エネルギーにより到達した乾燥密度の最大値（以下、到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ と称し、その打撃エネルギーによる縮固めで得られる乾燥密度の上限値として定義する）をデータとして取得した。乾燥密度は、縮固めに伴う層厚の変化を2測点で測定し、供試体の体積と材料投入量、含水比から計算した。

打撃エネルギー $E_{imp}$ は0.01Ecから0.56Ecの範囲で9ケースを設定した。重錘質量および重錘落下高さは、設定

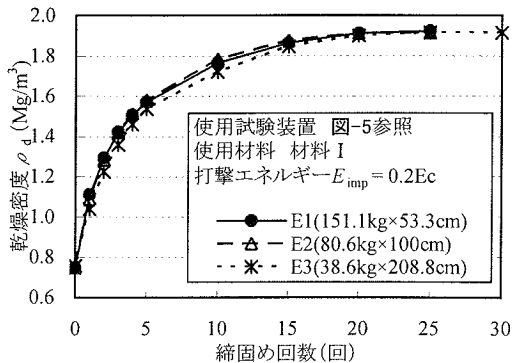


図-4 同一エネルギーによる予備縮固め試験結果

した打撃エネルギーに応じて、式(1)により34.9~221.6kg、11.36~171.76cmの範囲の組み合わせで設定した。縮固めの層数は1層とし、層厚は乾燥密度 $\rho_d = 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の状態では10cmになるように容器への材料の投入量を調整した。

縮固め試験は2回に分けて実施しており、それぞれ使用した材料が異なる。表-2に示した材料のうち、材料Iを用いた試験をPhase.1、材料IIを用いた試験をPhase.2として区分するものとした。表-3に試験ケースを整理した。

#### (3) 試験結果および考察

##### a) 試験結果

重錘質量と落下高さおよび縮固め回数から計算した材料に加わる総縮固めエネルギー $E_{ad}$ と乾燥密度 $\rho_d$ の関係を図-7に、縮固め回数と得られた乾燥密度 $\rho_d$ の関係を図-8に示した。図中では、Phase.1を実線、Phase.2を点線として試験Phaseを区別した。

図-7および図-8を見ると、総縮固めエネルギー $E_{ad}$ および縮固め回数の増加に伴い乾燥密度が上昇し、ある程

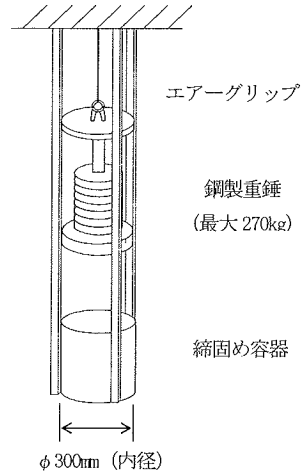


図-5 φ300mm落下縮固め試験装置

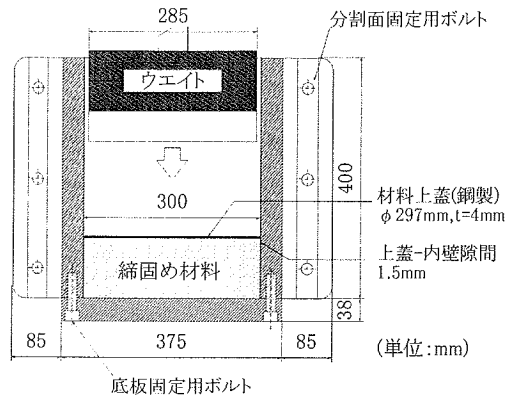


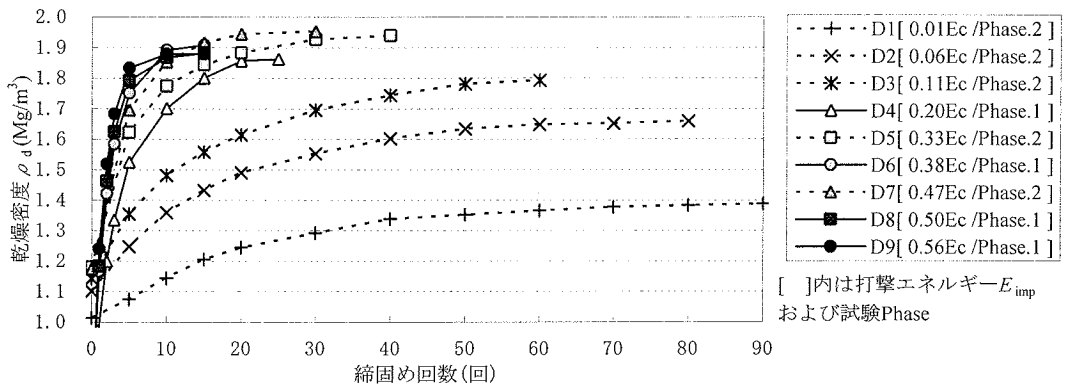
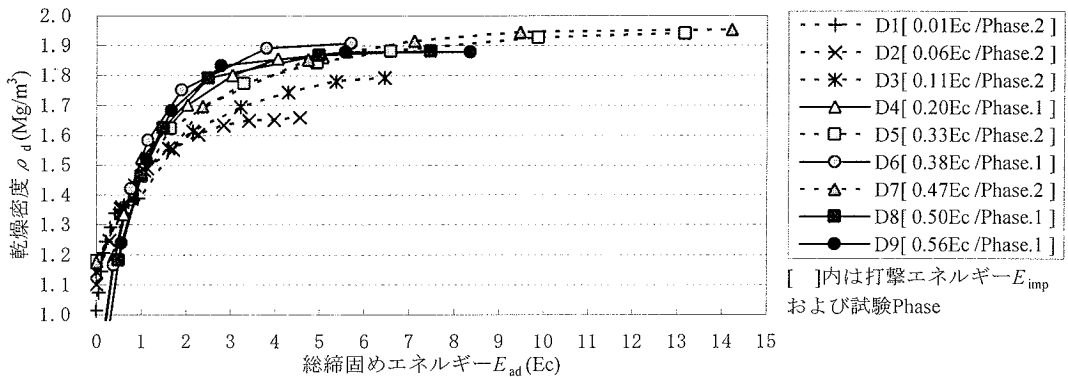
図-6 縮固め容器の構造

表-3 φ300落下締固め試験ケース

No	試験 Phase	重錘質量 (kg)	落下高さ (cm)	打撃エネルギー $E_{imp}$ (Ec)	含水比 (%)
D1	2	34.9	11.36	0.01	15
D2	2	34.9	58.04	0.06	15
D3	2	101.4	39.60	0.11	15
D4	1	80.6	100.00	0.20	16
D5	2	101.4	118.80	0.33	15
D6	1	151.1	100.00	0.38	16
D7	2	101.4	171.76	0.47	15
D8	1	198.1	100.00	0.50	16
D9	1	221.6	100.00	0.56	16

表-4 φ300落下締固め試験での到達乾燥密度

No.	打撃エネルギー $E_{imp}$ (Ec)	総締固めエネルギー $E_{ad}$ (Ec)	到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ (Mg/m <sup>3</sup> )
D1	0.01	0.9	1.39
D2	0.06	4.6	1.66
D3	0.11	6.5	1.79
D4	0.20	5.0	1.86
D5	0.33	13.2	1.94
D6	0.38	5.7	1.91
D7	0.47	14.2	1.95
D8	0.50	7.5	1.88
D9	0.56	8.4	1.88



度まで締固めが進むと、繰り返しエネルギーを与えても密度の上昇が見られなくなる。この時の乾燥密度が各ケースの到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$  であり、その値を表-4に整理した。到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$  は1.39~1.95Mg/m<sup>3</sup>の範囲となっており、打撃エネルギー  $E_{imp}$  により大きな差が見られる。

$E_{imp} \geq 0.2Ec$  の打撃エネルギーを設定したD4~D9は、図-7において総締固めエネルギー  $E_{ad}$  と乾燥密度  $\rho_d$  の関係を表す線がほぼ重複しており、打撃エネルギー  $E_{imp}$  が

大きい場合には総締固めエネルギー  $E_{ad}$  により乾燥密度を管理できるであろうことが読みとれる。 $E_{imp}$ ,  $E_{ad}$  および  $\rho_d$ ,  $\rho_{dupr}$  の関係の定量的な評価については後述する。

ここで、図中の実線と点線、つまり試験Phaseの違いに目を向けると、Phase.2の試験の方が到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$  が高く、反面、乾燥密度の増加が緩慢である傾向が見られる。これは、それぞれの試験で使用した材料の違いによるものと考えられる。材料I、材料IIの違いは、含水比およびベントナイトのモンモリロナイト

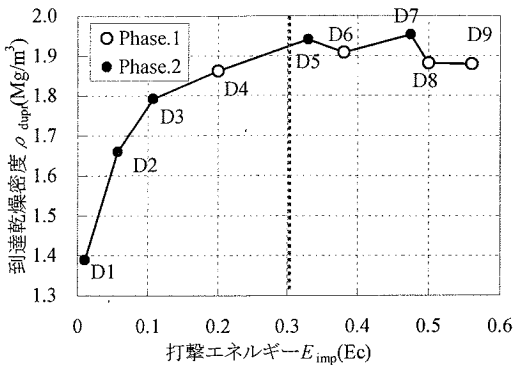


図-9 打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係

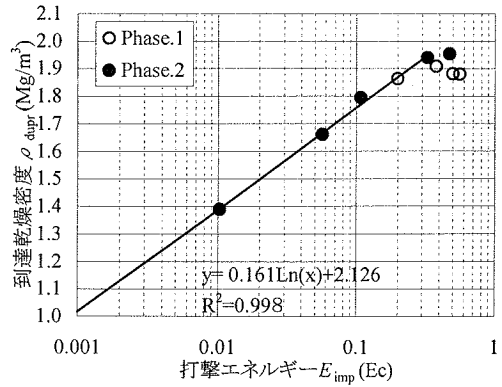


図-10 打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係 (回帰分析結果)

含有率である。

まず、含水比の違いに着目すると、材料Ⅱの方がわずかではあるが含水比が低い。ベントナイト・ケイ砂混合材料の土粒子の実質部分の密度を $\rho_s=2.70\text{Mg/m}^3$ とすると、ゼロ空気間隙曲線上の乾燥密度は $w=16\%$ の場合で $\rho_d=1.89\text{Mg/m}^3$ 、 $w=15\%$ の場合で $\rho_d=1.92\text{Mg/m}^3$ であり、それぞれの試験Phaseで得られた到達乾燥密度の最大値とほぼ同じである。 $\rho_d=1.9\text{Mg/m}^3$ 前後が締め固めにより得られる乾燥密度の上限となるのは、材料がゼロ空気間隙に近い状態まで締め固めが進み乾燥密度の増加が困難になるためであり、含水比の低い材料Ⅱの方がゼロ空気間隙曲線上となる乾燥密度が高いことから、高い乾燥密度まで締め固めが進行したものと考えられる。

また、モンモリロナイト含有率に着目すると、材料Ⅱに用いたベントナイトの方が8%高い。材料Ⅱは含水比も低く、モンモリロナイトに供給される水分量は材料Ⅰに比べ少ない。モンモリロナイト結晶層間に保持される水分量が少ない材料Ⅱは、締め固めにより粘結したモンモリロナイトの変形性が低く、そのため、材料Ⅰに比べ締め固めの過程における密度の上昇が緩慢になったものと推測される。モンモリロナイトの含有率の締め固め特性への影響を定量的に評価することは難しいが、粘土の締め固めにおいては微視的な粘土粒子の挙動が締め固め機構に影響することが知られており<sup>19)</sup>、モンモリロナイトの含有率も材料の締め固め特性に影響するものと考えられる。緩衝材の締め固めにおいては、モンモリロナイト含有率等のベントナイトの品質にも留意すべきである。

#### b) 打撃エネルギーと乾燥密度の関係

試験により得られた打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係を図-9に示した。 $E_{imp}=0.3\text{Ec}$ 前後を境界に傾向の変化が見られ、 $E_{imp}$ が小さい領域では $E_{imp}$ の増加に伴い $\rho_{dupr}$ の上昇が見られるが、 $E_{imp}$ が大きい領域では $E_{imp}$ によらず $\rho_{dupr}$ がほぼ一定である。このことから、本検討では $E_{imp} \geq 0.3\text{Ec}$ および $E_{imp} < 0.3\text{Ec}$ の領域

に区分して締め固め特性を整理した。

$E_{imp} < 0.3\text{Ec}$ の領域についてであるが、D1～D5のデータについて回帰分析を行い、 $\rho_{dupr}$ と $E_{imp}$ の相関式を導いた。なお、D5は $E_{imp}=0.33\text{Ec}$ であるが、区分した領域間の境界にあたるデータとして $E_{imp} < 0.3\text{Ec}$ の領域の検討に含むものとした。打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係について回帰分析を行った結果を図-10に示し、得られた相関式を式(2)に示した。これらの関係は対数関数により、精度良く表すことができる。

$$\rho_{dupr} = 0.161 \ln E_{imp} + 2.126 \quad (2)$$

ここに、

$\rho_{dupr}$  : 到達乾燥密度( $\text{Mg/m}^3$ )  
 $E_{imp}$  : 打撃エネルギー( $\text{Ec}$ )  
(ただし、 $E_{imp} < 0.3\text{Ec}$ )

一方、 $E_{imp} \geq 0.3\text{Ec}$ の領域では $\rho_{dupr}=1.9\text{Mg/m}^3$ 前後でほぼ一定となる。先に述べたように、ほぼゼロ空気間隙曲線上まで材料が締め固まったことで、密度の増加が困難になるためである。

以上の結果において、原位置締め固め工法による緩衝材施工システムの構築の観点から重要な知見は、施工可能な乾燥密度の上限が打撃エネルギーにより決定されることであろう。到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ は打撃エネルギー $E_{imp}$ で決まり、 $E_{imp} \geq 0.3\text{Ec}$ の場合には $\rho_{dupr}=1.9\text{Mg/m}^3$ 前後で一律となり、 $E_{imp} < 0.3\text{Ec}$ 以下の場合には式(2)により $\rho_{dupr}$ が与えられる。本検討において施工目標の目安とした乾燥密度 $\rho_d=1.6\sim 1.8\text{Mg/m}^3$ の緩衝材を施工するためには、式(2)より $E_{imp}=0.04\sim 0.14\text{Ec}$ 以上の打撃エネルギーを与える必要があるということになる。

なお、上記の結果は室内試験結果に基づくものであり、実施工との施工規模等の違いから、実際の施工システム

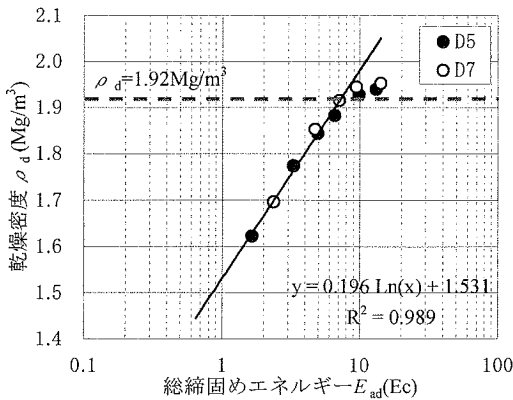


図-11 総締固めエネルギー $E_{ad}$ と乾燥密度 $\rho_d$ の関係 (回帰分析結果)

の設計にそのまま適用できるものではない。実施工との差異に関する検討については次章で報告する。

### c) 総締固めエネルギーと乾燥密度の関係

$E_{imp} \geq 0.3Ec$ の打撃エネルギーを与えた場合、図-7に対する考察で述べたように、 $\rho_d = 1.9\text{Mg/m}^3$ 前後を上限に、総締固めエネルギー $E_{ad}$ により得られる乾燥密度 $\rho_d$ が決定されると考えられる。ここでは、式(2)が主に材料IIを用いたPhase.2の試験結果に基づき導いた相関式であることから、同じくPhase.2の試験において $E_{imp} \geq 0.3Ec$ の打撃エネルギーを与えたD5およびD7の試験結果のうち、 $\rho_d < 1.92\text{Mg/m}^3$  (ゼロ空気間隙曲線上に未到達の乾燥密度の範囲)の領域について、 $E_{ad}$ と $\rho_d$ の関係について相関式を導いた。回帰分析の結果を図-11、導いた相関式を式(3)として示した。

$$\rho_d = 0.196 \ln E_{ad} + 1.531 \quad (3)$$

ここに、

$\rho_d$  : 乾燥密度( $\text{Mg/m}^3$ )

( $\rho_d \geq 1.92\text{Mg/m}^3$ の場合、 $\rho_d = 1.92\text{Mg/m}^3$ )

$E_{ad}$  : 総締固めエネルギー( $\text{Ec}$ )

一方、打撃エネルギーが $E_{imp} < 0.3Ec$ の場合、乾燥密度 $\rho_d$ と総締固めエネルギー $E_{ad}$ の関係は、打撃エネルギー $E_{imp}$ によって異なるため単純に定式化はできないが、図-7から同じ乾燥密度まで締固めるために必要な $E_{ad}$ は $E_{imp}$ が小さい方が大きい傾向にあることが分かる。ここで、参考に $\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$ の乾燥密度を得るために必要な総締固めエネルギー $E_{ad}$ および締固め回数と打撃エネルギー $E_{imp}$ の関係を図-12に示した。図-12から、打撃エネルギーの増加に伴い必要な締固め回数は減少し、また、 $E_{imp} < 0.3Ec$ の領域については、打撃エネルギーの増加に伴い締固めに要する総締固めエネルギーが減少する傾

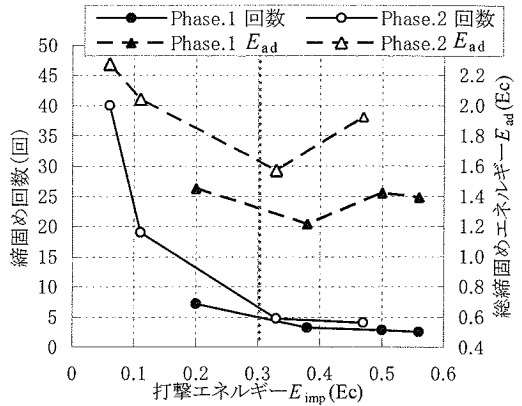


図-12  $\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$ の締固めに要する締固め回数および総締固めエネルギー $E_{ad}$ と打撃エネルギー $E_{imp}$ の関係

向が見られる。つまり、打撃エネルギーを大きくすることは総締固めエネルギーおよび締固め回数の減少につながり、締固め作業の合理化に寄与するものと考えられる。

ただし、本報告の冒頭でも述べたように、衝撃による周辺岩盤損傷の問題から、打撃エネルギー $E_{imp}$ の上限が制限される場合もあり、許容される範囲において合理的な締固めエネルギーを設定することが、施工システム的设计においては重要である。

## 4. $\phi 2360\text{mm}$ 実施工模擬締固め試験

### (1) 試験の目的

土質材料の締固め特性については、室内試験と実施工では境界条件等が異なるため室内試験結果を単純に実施工に反映することは難しく、また、その関係の定量化は様々な研究がなされているものの、扱われる土質材料の多様性もあり実現されていない。従って、3章で得られた $\phi 300\text{mm}$ 落下締固め試験に基づく材料の締固め特性についても、実際の施工システムの構築にそのまま適用することはできない。実施工における材料の締固め特性を適切に把握するためには、実施工を模擬した試験の実施が必要であるが、実施工模擬締固め試験により締固め特性に関するすべてのデータを取得することは経済的、時間的に非合理であり、実施工と室内試験による締固め特性の傾向の違いを把握し、その上で室内試験によるデータ整備を進めることが現実的である。本章では、緩衝材の実施工を模擬した締固め試験を実施し、実規模でのベントナイト・ケイ砂混合材料の動的締固め特性を把握するとともに、3章で実施した $\phi 300\text{mm}$ 落下締固め試験結果と比較することで、実施工と室内試験の締固め特性の傾向の違いについて検討を行った。

## (2) 試験方法

試験は、実際の高レベル放射性廃棄物処分場で行われる緩衝材施工を模擬した実規模の締固め試験装置および処分孔を模擬したコンクリートピットを用いて行った。

図-13および図-14に試験装置の全体図およびコンクリートピット内の構成を示す。コンクリートピットの仕様は、核燃料サイクル開発機構の第2次とりまとめ<sup>8)</sup>で示された処分孔の仕様に準ずる。コンクリートピットの内径は、重錘とピット内側側壁のクリアランス等の追加により図-1に示した仕様より140mm拡大した2360mmとし、深さは3260mmとした。重錘は質量2100kg（重錘1000kg×2+支持機構部100kg）、受圧部面積3800cm<sup>2</sup>（1900cm<sup>2</sup>×2）の扇形で、160°の範囲で回転する機能を有し、全断面に対して締固めを行うことが可能な機構となっている。打撃エネルギー $E_{imp}$ は、重錘の落下高さを変えることで調整した。また、緩衝材の中心に廃棄体を定位置するための空

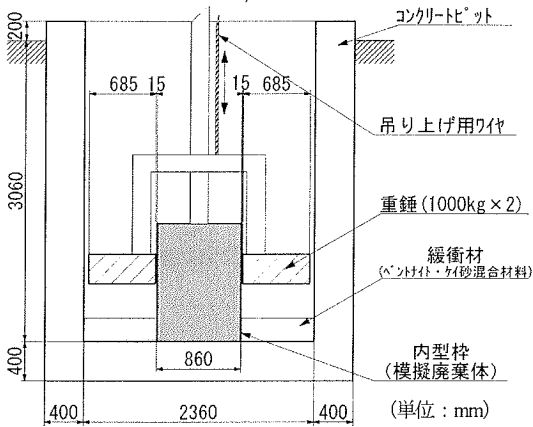


図-13 実施工模擬締固め試験装置

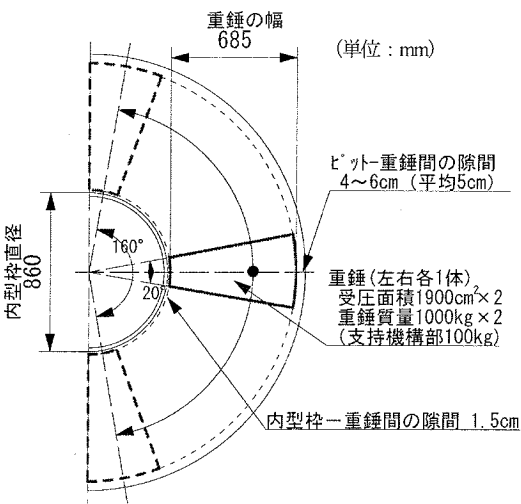


図-14 試験ピット内部の構成

間を構築するため、外径860mmの模擬廃棄体（鋼製内型枠）を設置している。使用した材料は、材料Ⅱ（表-2参照）である。締固めの層厚は、 $\rho_d=1.6\text{Mg/m}^3$ の乾燥密度において仕上がり層厚が10cmになるよう材料の投入量を設定した。

試験は、初めに $E_{imp}=0.05\text{Ec}$ で1打撃あたりの層厚の変形量が0.2mm以下になるまで締固めを行い、そのとき得られた乾燥密度をその打撃エネルギー $E_{imp}$ における到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ とした。同様に $E_{imp}=0.1\text{Ec}$ ,  $0.2\text{Ec}$ ,  $0.3\text{Ec}$ の順で打撃エネルギーを増加させて締固めを行い、それぞれの $E_{imp}$ に対する $\rho_{dupr}$ を測定した。乾燥密度は、ピット中心より8方向3測点、合計24測点で層厚を測定し、測定した層厚の平均値と、材料投入量、含水比から計算した。試験ケースの条件を表-5に整理した。

## (3) 試験結果および考察

### a) 試験結果

試験により得られた総締固めエネルギー $E_{ad}$ と乾燥密度 $\rho_d$ の関係を図-15に、打撃エネルギー $E_{imp}$ に対応する到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ を表-6に整理した。この結果から、前章の検討同様、回帰分析により打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係について対数関数による相関式を導いた。打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$

表-5 実規模締固め試験ケース

No.	重錘質量 (kg)	落下高さ (cm)	打撃エネルギー $E_{imp}$ (Ec)
R1	2100	5	0.05
R2	2100	10	0.1
R3	2100	20	0.2
R4	2100	30	0.3

表-6 打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$

No.	打撃エネルギー $E_{imp}$ (Ec)	到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ (Mg/m <sup>3</sup> )
R1	0.05	1.38
R2	0.1	1.53
R3	0.2	1.67
R4	0.3	1.81

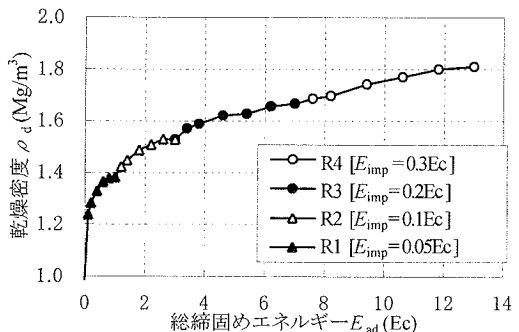


図-15 総締固めエネルギー $E_{ad}$ と乾燥密度 $\rho_d$ の関係



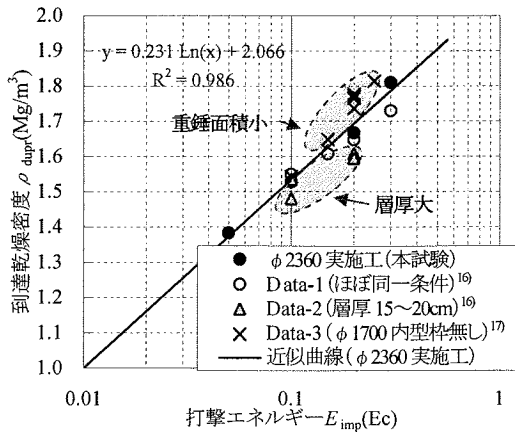


図-16 打撃エネルギー $E_{imp}$ と到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の関係 (回帰分析結果)

表-7 比較対象とした試験結果の条件一覧

	本試験	Data-1 <sup>16)</sup>	Data-2 <sup>16)</sup>	Data-3 <sup>17)</sup>
使用材料	材料II	材料II	材料II	材料I
ピット直径	2360mm	同左	同左	1700mm
内型枠有無	有	同左	同左	無
打撃エネルギー	0.05 ~0.3Ec	0.1 ~0.3Ec	0.2Ec	0.1 ~0.2Ec
重錘面積	3800cm <sup>2</sup>	同左	同左	2522cm <sup>2</sup>
重錘質量	2100kg	同左	同左	1000kg
締め層厚	10cm	同左	15~20cm	15~30cm
施工目標	変形量 0.2mm/打撃 以下まで	変形量 1.0mm/打撃 以下まで	同左	施工目標 $\rho_d > 1.75$ Mg/m <sup>3</sup>

の関係について回帰分析を行った結果を図-16に示し、得られた相関式を式(4)に示した。

$$\rho_{dupr} = 0.231 \ln E_{imp} + 2.066 \quad (4)$$

ここに、

$\rho_{dupr}$  : 到達乾燥密度(Mg/m<sup>3</sup>)

$E_{imp}$  : 打撃エネルギー(Ec)

なお、図-16には、参考として筆者らが別途実施した実規模レベルの動的締め試験の結果<sup>16), 17)</sup>もプロットした。これらのデータの試験条件は表-7に整理した。層厚、重錘面積等試験条件が異なる条件のデータについても、ほぼ式(4)線上にプロットされる。層厚が薄く、また重錘面積が小さい方が、得られる乾燥密度がわずかに高い傾向が見られ、層厚および重錘面積に応じた式の補正の必要性も示唆されるが、本試験の締め条件もしくはそれに近い締め条件であれば、式(4)により実施工にお

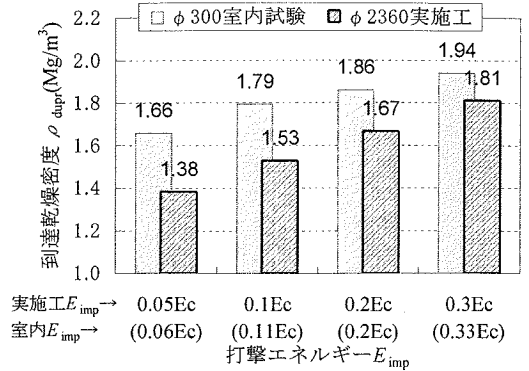


図-17 試験規模による到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ の差

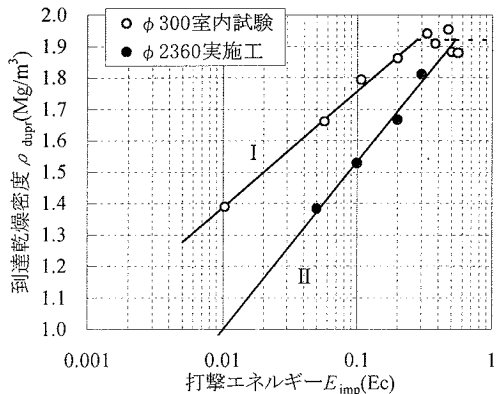


図-18 室内/実施工模擬試験の $\rho_{dupr} - E_{imp}$ の関係の比較

ける到達可能乾燥密度について高い精度の予測が期待できる。

#### b) 実施工におけるエネルギー損失

実施工においては、境界条件等の違いから、同じ材料を用いた場合でも室内試験とは異なる締め特性を示すのが一般的である。図-17に、ほぼ同じ打撃エネルギー $E_{imp}$ で締めを行ったケースの到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ について、 $\phi 2360$ mm実施工模擬締め試験（以下 $\phi 2360$ 実施工と称す）と $\phi 300$ mm落下締め試験（以下 $\phi 300$ 室内試験と称す）の結果を比較したものを示すが、 $\phi 300$ 室内試験に比べ $\phi 2360$ 実施工で得られた到達乾燥密度の方が、7~17%程度小さい値となっている。ここでは、便宜的に $\phi 2360$ 実施工での到達乾燥密度の低下の原因を、境界条件の違いに起因する材料の締めめに消費されるエネルギーの減少、つまり緩衝材に作用する打撃エネルギーの損失が生じているものと考え、 $\phi 2360$ 実施工と $\phi 300$ 室内試験の結果を比較することで、室内試験に対する実施工でのエネルギーの損失の程度について検討を行った。

検討は、それぞれの $\rho_{dupr}$ 、 $E_{imp}$ の関係式として導いた式(2)および式(4)の比較をすることで行った。それぞれの式を比較したものを図-18に示す。図中の線Iは

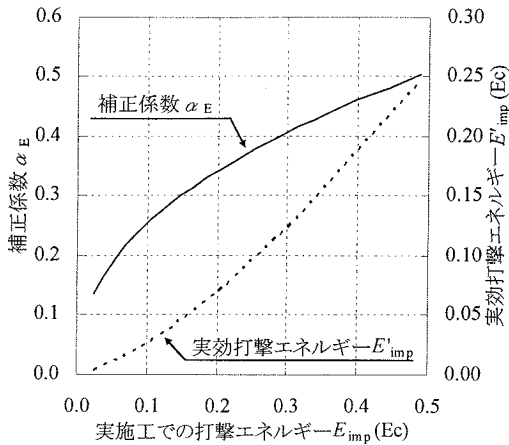


図-19 実施工での打撃エネルギー $E_{imp}$ 、補正係数 $\alpha_E$ および実効打撃エネルギー $E'_{imp}$ との関係

式(2)、線Ⅱは式(4)を示す。図-18を見ると、同じ乾燥密度を達成するために必要な打撃エネルギー $E_{imp}$ は $\phi 300$ 室内試験の方が小さく、乾燥密度が低い領域ほど、その傾向が顕著であることが分かる。ここで、室内試験に対する実施工での打撃エネルギーの有効作用率を補正係数 $\alpha_E$ とし、それぞれのスケールでの打撃エネルギーと乾燥密度の関係式である式(2)および式(4)を連立させることで $\alpha_E$ の予測式を導出した。補正係数 $\alpha_E$ の定義は式(5)のとおりとし、式(2)および式(4)に同じ $E_{imp}$ を代入した場合に到達乾燥密度 $\rho_{dupr}$ が等しくなるよう $\alpha_E$ を導いた。 $\alpha_E$ の導出手順および得られた予測式を式(6)に示す。式中の実効打撃エネルギー $E'_{imp}$ は、実施工における打撃エネルギーの損失分を除いて室内試験で緩衝材に作用する打撃エネルギー相当に換算したエネルギーである。 $\alpha_E$ は打撃エネルギー $E_{imp}$ により変化するため、相関式は $E_{imp}$ の関数とした。

$$\rho_{dupr} = f'(E_{imp}) = f(E'_{imp}) = f(\alpha_E \cdot E_{imp}) \quad (5)$$

$$f'(E_{imp}) = f(\alpha_E \cdot E_{imp})$$

$$0.231 \ln E_{imp} + 2.066 = 0.161 \ln \alpha_E \cdot E_{imp} + 2.126$$

$$\ln \alpha_E = \frac{0.07 \ln E_{imp} - 0.06}{0.161} = 0.435 \ln E_{imp} - 0.373 \quad (6)$$

$$\alpha_E = \exp(0.435 \ln E_{imp} - 0.373) = 0.689 E_{imp}^{0.435}$$

$$\alpha_E = 0.689 E_{imp}^{0.435}$$

表-8 目標乾燥密度と必要な打撃エネルギー $E_{imp}$

目標乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	必要打撃エネルギー $E'_{imp}$ (室内試験)	必要打撃エネルギー $E_{imp}$ (実施工)	補正係数 $\alpha_E$
1.50	0.02 Ec	0.09 Ec	0.24
1.60	0.04 Ec	0.14 Ec	0.29
1.70	0.08 Ec	0.21 Ec	0.35
1.80	0.14 Ec	0.32 Ec	0.42
1.90	0.25 Ec	0.48 Ec	0.50

ここに、

$E_{imp}$  : 実施工の締固めで与える打撃エネルギー(Ec)

(ただし $E'_{imp} (= \alpha_E \cdot E_{imp}) \leq 0.3Ec \therefore E_{imp} \leq 0.53Ec$ の範囲)

$E'_{imp}$  : 実施工でのエネルギー損失を考慮した実効打撃エネルギー(Ec)

$\alpha_E$  : 打撃エネルギーの補正係数

$f(x)$  : 室内試験に基づく $E_{imp} \rightarrow \rho_{dupr}$ の関数

$f'(x)$  : 実規模試験に基づく $E_{imp} \rightarrow \rho_{dupr}$ の関数

図-19に、実施工における打撃エネルギー $E_{imp}$ と補正係数 $\alpha_E$ および実効打撃エネルギー $E'_{imp}$ の関係を示した。実施工での打撃エネルギー $E_{imp} = 0.1 \sim 0.5Ec$ の範囲では、逸散等によるエネルギーの損失を除くと、緩衝材に有効に作用する打撃エネルギーは、1/2~1/4程度まで大きく低下している。また、打撃エネルギーが小さい方がエネルギーの有効作用率が小さく、実施工と室内試験の乖離が大きくなる傾向が明確に現れている。

本検討で得られた補正係数 $\alpha_E$ については、実施工において与える打撃エネルギーに乗じることで、有効に作用する室内試験に相当する打撃エネルギーを推測することが可能であり、施工目標とする乾燥密度を得るために必要な実施工における打撃エネルギーの設定を、室内試験結果に基づき行う場合などに利用することができる。なお、式(6)の関係は、室内試験および実施工の締固めの条件(例えば層厚、緩衝材寸法、重錘形状等)にも依存するため、これらの条件が変わる場合には修正を行う必要があるが、図-16の比較でも、締固め層厚、処分孔の寸法の変化が締固めにより得られる乾燥密度に与える影響は大きくない結果となっており、施工形態等に大きな変更を伴わない範囲の条件変化であれば、式(6)による補正係数の適用により打撃エネルギーの有効作用率を概ね推定できるものと考えられる。

#### c) 実施工において必要な締固めエネルギーと原位置締固め工法の適用範囲

$\rho_d = 1.5 \sim 1.9 \text{ Mg/m}^3$ の乾燥密度を得るために要求される打撃エネルギー $E_{imp}$ について、式(2)および式(4)に基づき計算した結果を表-8に示す。本検討において目標とした $\rho_d = 1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の緩衝材を実施工で得るためには、

$E_{imp} = 0.14Ec \sim 0.32Ec$ 以上の打撃エネルギーが必要である。

今回実施した  $\phi 2360\text{mm}$  実施工模擬締固め試験では、 $E_{imp} = 0.3Ec$  (重錘質量 $2100\text{kg} \times$ 落下高さ $30\text{cm}$ )の打撃エネルギーにより締固めを行うことで、最大  $\rho_d = 1.8\text{Mg/m}^3$  程度の乾燥密度の緩衝材が実際に施工できており、周辺岩盤損傷の問題から打撃エネルギーに制限を受けない条件であれば、 $\rho_d = 1.8\text{Mg/m}^3$ 以下の範囲の緩衝材の施工に対して本工法で対応できる見通しを得ることができたといえる。

## 5. 結論

以上の検討をとおして得られた主な知見を下記に整理する。

- 1) ベントナイト・ケイ砂混合材料 (ケイ砂混合率  $R_s = 30\%$ , 含水比  $w = 15 \sim 16\%$ ) を対象にした動的締固めでは、締固めにより得られる乾燥密度の上限 (到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$ ) は 1 打撃あたりの締固めエネルギー (打撃エネルギー  $E_{imp}$ ) で決定される。  $\phi 300\text{mm}$  室内締固め試験における到達乾燥密度は、 $E_{imp} < 0.3Ec$  の範囲は式(2)で与えられ、 $E_{imp} \geq 0.3Ec$  の範囲においては、ほぼゼロ空気間隙曲線上となる  $\rho_{dupr} = 1.9\text{Mg/m}^3$  前後で一定となる。
- 2) 打撃エネルギー  $E_{imp}$  を大きくすることで、締固め回数の減少および総締固めエネルギー  $E_{ad}$  の低減が可能である。衝撃による周辺岩盤の損傷が生じない範囲で大きな打撃エネルギーを与えることにより、緩衝材施工の合理化が期待できる。
- 3) 実施工を模擬した  $\phi 2360\text{mm}$  実施工模擬締固め試験により、実施工における到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$  打撃エネルギー  $E_{imp}$  の関係についてデータを取得した。実施工でのこれらの関係は式(4)で与えられる。
- 4) 実施工模擬締固め試験では、エネルギーの逸散等から室内試験に比べ締固めにより得られる乾燥密度が小さい。実施工でのエネルギーの有効作用率を表す補正係数  $\alpha_E$  を導いた。打撃エネルギー  $E_{imp} = 0.1 \sim 0.5Ec$  の範囲では、実効打撃エネルギーは実際の打撃エネルギーに比べ  $1/2 \sim 1/4$  まで低下する。
- 5) 打撃エネルギー  $E_{imp}$  が小さい方がエネルギーの有効作用率を表す補正係数  $\alpha_E$  が小さい傾向が見られ、実施工と室内試験の乖離が大きい。
- 6) 実施工において  $\rho_d = 1.6 \sim 1.8\text{Mg/m}^3$  の乾燥密度を得るために必要な打撃エネルギーは  $E_{imp} = 0.14 \sim 0.32Ec$  である。実施工模擬締固め試験では、 $E_{imp} = 0.3Ec$  の打撃エネルギーを与えることで最大  $\rho_d = 1.8\text{Mg/m}^3$  の乾燥密度の緩

衝材を施工できており、 $\rho_d = 1.8\text{Mg/m}^3$  以下の範囲の緩衝材施工に対して本工法により対応できる見通しを得ることができた。

本検討では、核燃料サイクル開発機構による試設計に基づく標準的な緩衝材材料<sup>2)</sup>を対象としたベントナイト・混合材料の締固め特性の傾向の把握および締固め特性の定式化を実施し、原位置締固め工法の締固め方法、締固めエネルギーの設定等合理的な緩衝材施工システムの構築に生かせるデータを取得することができた。

一方、今回の検討では緩衝材の仕様を限定して試験を実施したが、今後、処分サイトの選定等処分事業の進展に伴う人工バリア設計の合理化による緩衝材仕様・寸法、使用材料等の変更が予想され、想定される様々な条件変化に対応したデータの拡充およびそれらを反映した締固め特性の定量化は、今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 原子力委員会：放射性廃棄物対策専門部会報告「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方」, 1989.
- 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 分冊 2, 第IV章 処分場の設計に関する検討, pp.IV-182~IV-189, 2000.
- 3) Awano, T., Kanno, T., Ueda, H., Kimoto, T.: Emplacement Technique of Monolithic Buffer Material, *DisTec2000*, pp.153~158, 2000.
- 4) Jukka-Pekka Salo and Tapani Kuikkola: Bentonite pellets, an alternative buffer material for spent fuel canister deposition holes, *Sealing of Radioactive Waste Repositories*, 1989.
- 5) 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, 4.3.2 ハンドリング・定置・回収装置の概念設計, pp.4-684~4-757, 2001.
- 6) 小野文彦, 増田良一, 西村毅, 雨宮清: 緩衝材原位置締固め工法の検討—衝撃解析による周辺岩盤の挙動の検討—, 第55回土木学会年次講演会, CS-192, 2000.
- 7) 杉田裕, 千々松正和, 藤田朝雄: 釜石鉱山における粘土充填・熱負荷試験, サイクル機構技報, No.3, pp.33~43, 1999.
- 8) 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 分冊 2, 第IV章 処分場の設計に関する検討, pp.IV-69~IV-156, 2000.
- 9) 電気事業連合会：高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術 第5編 人工バリアの設計と製作, pp.5.1-1~5.4-1, 2000.
- 10) 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, 4.3.2 ハンドリング・定置・回収装置の概念設計, pp.4-559~4-648, 2001.
- 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, 3.4.2 原位置締固め緩衝材の施工技術に関する研究, pp.3-439~3-467, 2002.
- 12) 動力炉・核燃料開発事業団: ベントナイトの基本特性調査, 6-3-1 ベントナイトの基本特性試験結果, pp.62~63, 1989.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 日本粘土学会: 粘土ハンドブック第二版, III. 応用編 5. 土木・建築における粘土, pp.1079~1082, 1987.
- 16) 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, 3.2.2 内型枠方式原位置締固め試験, pp.3-329~3-353, 2003.
- 17) 小野文彦, 出口朗, 雨宮清, 小林正明, トラゲデュケーション: 緩衝材原位置締固め工法の検討—原位置締固め模擬試験—, 第56回土木学会年次講演会, CS1-006, 2001.

(2003. 5. 12 受付)

## STUDY ON DYNAMIC COMPACTION OF A BUFFER MATERIAL MIXED WITH BENTONITE FOR H.L.W. FINAL DISPOSAL

Ryoichi MASUDA, Hidekazu ASANO, Kiyoshi AMEMIYA, Masakazu CHIJIMATU, Kakuichiro ADACHI and Hideo KOMINE

In-situ compaction method is an alternative technology for the construction of a buffer at HLW final disposal. Understanding of the compaction characteristics of the proposed material is important for this method of construction. In this report, paying attention to the relation between compaction energy and the achieved maximum dry density, dynamic compaction characteristic of bentonite and silica sand mixture material is examined.