

人工バリア施工における粒状ベントナイトの効率的締固め技術の開発

粒状ベントナイトの振動特性を利用した合理的締固め技術

森川 義人^{*1}・根木 政広^{*1}・白瀬 光泰^{*1}・遠藤 さち恵^{*1}・藤原 齊郁^{*2}・立石 洋二^{*3}

Keywords : radioactive waste, bentonite buffer material, compaction works, efficiency, frequency, vibratory force

放射性廃棄物、ベントナイト系材料、締固め、効率性、振動周波数、起振力

1. はじめに

低レベル放射性廃棄物のうち、放射能濃度が比較的高い廃棄物を埋設処分する施設が余裕深度処分埋設施設（L1 施設）であり、図-1 に示すように地下 50m 以深に処分空洞が帯状に構築される。余裕深度処分施設は、廃棄体が埋設処分されるコンクリートピットを含め、その周囲に多重の人工バリアが構築される構造（図-1 参照）になっている^{1), 2)}。本研究で対象とする粒状ベントナイトは低透水層（ベントナイト系材料）に適用され、所定の遮水性能を満足するための目標乾燥密度が設定されている。低透水層（ベントナイト系材料）は、図-1 に示すように低拡散層（セメント系材料）と埋め戻し材（覆工コンクリート）で挟まれた範囲に施工される。特に側部は幅 1m の狭隘な施工条件下により、小型の締固め機械を使用せざるを得ないことから、所定の乾燥密度を得るために多くの締固め転圧回数が必要とされ、各仕上がり層における上下乾燥密度のバラツキ改善の余地も残されている。そこで、

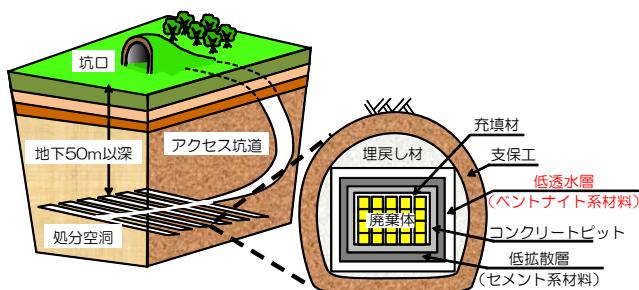


図-1 余裕深度処分施設（L1 施設）の概要
Fig.1 Conceptual drawing of intermediate depth disposal facility (L1 repository)

* 1 原子力本部 原子力技術第三部

* 2 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

* 3 土木本部 機械部

本研究では、粒状ベントナイトの力学特性と振動特性を利用した締固め実験を行い、合理的締固め技術として「効率的締固めプロセス」（3Step 締固め工法）を開発した。本技術は、従来の締固め方法に対して 2 倍の締固め効率（締固め転圧回数、締固め時間が約 50%）を達成し、さらに仕上がり層の上下密度のバラツキも低減することができた。

2. 技術の概要

2.1 締固め材料（粒状ベントナイト）

余裕深度処分埋設施設（L1 施設）の低透水層（ベントナイト系材料）は、高い遮水性能が要求されており、飽和時の初期止水性能設定値は $k \leq 5 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ に設定されている。この透水係数設定値を満足するための施工管理目標として、ベントナイトの乾燥密度が $\rho_d = 1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ に設定されている³⁾。本研究では、低透水層（ベントナイト系材料）の締固め施工の有力な候補材料である加水調整粒状ベントナイト「クニゲル GX」（図-2）（以下「粒状ベントナイト」と記す）の振動特性を有効に利用した効率的締固め技術を開発した。

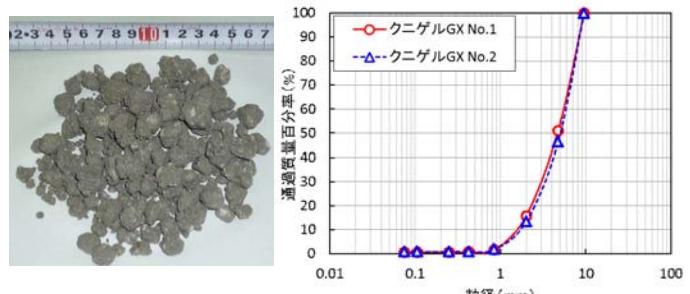


図-2 加水調整粒状ベントナイト（10mm 以下に粒調）

Fig.2 Granular bentonite material adjusted to optimum moisture content

粒状ベントナイトは図-2に示すように、原鉱石を粉碎した原材料（クニゲルGX）を含水比 $21\pm2\%$ で加水調整後、高速ミキサーにて最大粒径 10mm 程度の粒度分布となるように造粒したものである。

2.2 開発技術の原理

2.2.1 効率的締固めの基本プロセス

粒状ベントナイトを目標乾燥密度 $\rho_d=1.6\pm0.1\text{Mg/m}^3$ まで締固めるには、図-3に示すように撒き出された粒状ベントナイトを締固め、さらに連続体（一体）となるまで圧縮（潰す）する必要がある。側部低透水層の施工において目標乾燥密度を満足するためには、従来の締固め方法では、小型振動ローラもしくは振動コンパクターにて12~14パスの締固めエネルギー（転圧パス数）が必要とされ、さらに締固め後の上下密度にバラツキが生じる結果となった。この多くの転圧パス数が必要な原因と各層上下密度のバラツキの原因については以下のように考察された。

- ◆ 粒状ベントナイトは容易に変形し易いため、締固め初期段階から過大な接地圧、起振力で締固めると図-4の下図のように表層部が圧縮され（潰され）下部の空隙の空気が排除されない状態となる。その結果、ある程度までは密度増加が進むが、最終的には間隙中に内在する空気が抵抗となり、密度増加が抑えられる。

- ◆ 締固め後の仕上がり層は、圧縮され密度が大きい上部と空隙が残存した粒状体で密度が小さい下部が混在し、密度にバラツキのある仕上がり層となる。

そこで本研究では、粒状ベントナイトを効率的に締固め、仕上がり層上下の密度のバラツキを低減するための締固めの基本プロセスを検討することとした。まず、粒状ベントナイトを変形、圧縮させずに振動を与える、密度増加を図る方法を検討するために、粒状ベントナイトの振動特性基本実験を実施した。

2.2.2 粒状ベントナイトの振動特性基本実験

粒状ベントナイトの振動特性基本実験では、粒状ベントナイトが塑性変形せず、極力形状を維持した状態で振動締固めを行った場合の振動周波数 f と密度 ρ の関係を把握した。図-5に示すように、モールド（ $\phi=100\text{mm}$, $h=200\text{mm}$ ）内に一定量の粒状ベントナイトを自然落下（落下高さ約 100mm ）にて投入し、振動実験を行った。実験は、振動モーターと連動した載荷板を粒状ベントナイトが圧縮変形しない程度の上載荷重（ $p=100\text{kN/m}^2$ ）にて静的に載荷した後、振動周波数 f を変えた振動載荷を30秒間与えた後、沈下量を計測してモールド内の粒状ベントナイトの密度を測定した。実

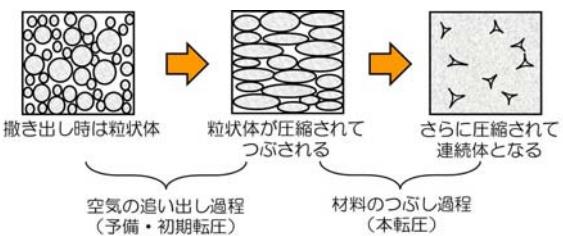


図-3 粒状ベントナイトの締固め模式図
Fig.3 Compaction mechanism of granular bentonite material

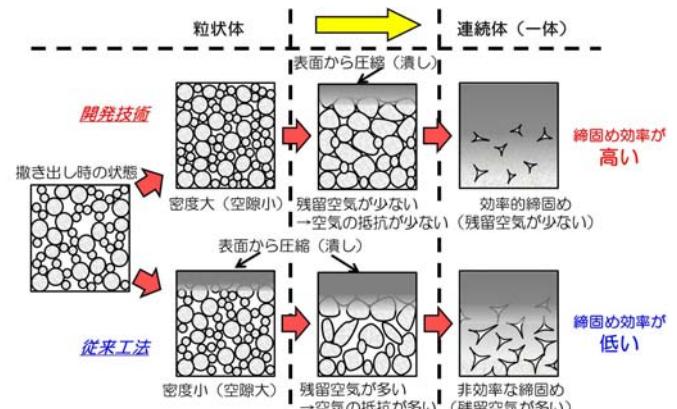


図-4 粒状ベントナイトの締固め技術の概念図
(従来工法 VS 開発技術)
Fig.4 Comparison of previous and proposed methods for bentonite compaction



図-5 振動特性基本実験（載荷試験機）
Fig.5 Loading test equipment for basic study of vibration characteristics

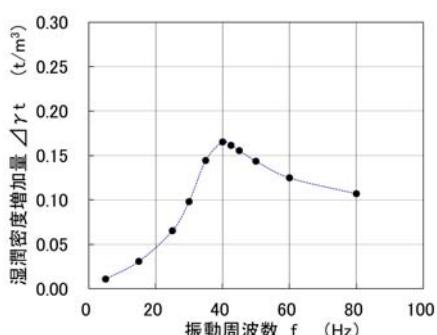


図-6 振動周波数 f - 乾燥密度增加量 $\Delta\rho_d$ の関係
Fig.6 Relationship between vibratory frequency and dry density increment

験の結果、密度増加量 $\Delta\rho_d$ （振動載荷後の乾燥密度 - 静的載荷後の乾燥密度）が最大となる振動周波数 f が存在する締固め曲線が得られることを確認した⁴⁾。図-6に示すように、密度増加量 $\Delta\rho_d$ が最大となる振動周波

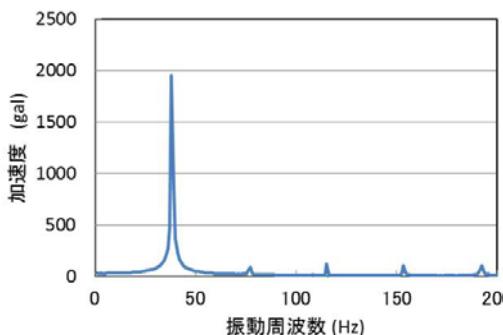
図-7 加速度波形の振動周波数分析結果 ($f=40\text{Hz}$)

Fig.7 Frequency analysis of acceleration waveform at 40 Hz vibration

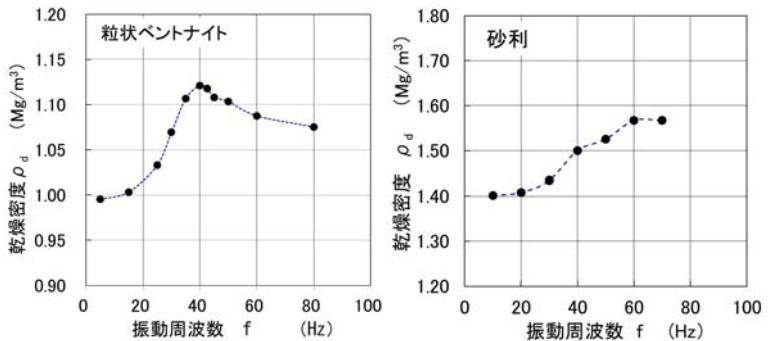
図-8 振動周波数 f -乾燥密度 ρ_d 関係 (粒状ベントナイト, 砂利)

Fig.8 Relationship between vibratory frequency and dry density for bentonite and gravel

数は $f=40\text{Hz}$ であり、載荷板に取り付けた加速度計から得られる加速度波形の振動周波数の分析結果を図-7に示す。粒状ベントナイト以外の土質材料（砂利）についても同様の実験を行い、振動周波数 f と乾燥密度 ρ_d の関係を比較した（図-8 参照）。粒状ベントナイトの場合、乾燥密度のピーク値が存在する締固め曲線（振動周波数 f -乾燥密度 ρ_d 関係）が得られるのに対し、砂利の場合は明確な乾燥密度のピーク値は現れなかった。この乾燥密度のピーク値の振動周波数 f を

「最適振動周波数 f_{opt} 」と定義した。最適振動周波数 f_{opt} はその材料の共振振動周波数 f_r に相当し、粒度分布、含水比および締固め状態などに依存すると考えられる。締固めの進行に伴い粒子接点数が増加し締固め状態が変化するため、粒子密度の増加に伴い共振振動周波数 f_r も変化すると予想される。したがって、振動特性基本実験では、撒き出し直後の粒状ベントナイトの最適振動周波数は $f_{\text{opt}}=40\text{Hz}$ であったが、締固めの進行に伴いその値は増加していくと考えられる。

2.2.3 締固め機械による基礎実験

粒状ベントナイトを圧縮（潰し）させずに最大限まで粒状密度を増加させるには、締固め Step1 から締固め Step2 へと振動パラメータを変化させて締固める方法を考えられる。そこで、粒状ベントナイトの粒状密度を増加させるための締固めのメカニズムを調べることを目的として、締固め機械の起振力 F_0 を変えて締固め密度の変化を調べた。実験では、粒状ベントナイトに過剰な接地圧を与えることなく締固めが行える締固め機械として、振動コンパクターを選定し、振動系統部品を改造し、振幅と振動周波数を変えた起振力 F_0 の異なるパラメトリックスタディーの締固め実験を行った。振動コンパクターなどの振動締固め機械に使用される起振機は、偏芯錘を回転させることにより発生する遠心力を起振体（振動コンパクターの場合は振動プレート）に伝達しており、式（1）で示される。

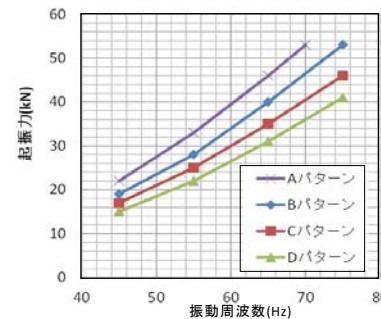


図-9 振動コンパクターの周波数と起振力の関係

Fig.9 Relationship between compactor frequency and vibratory force

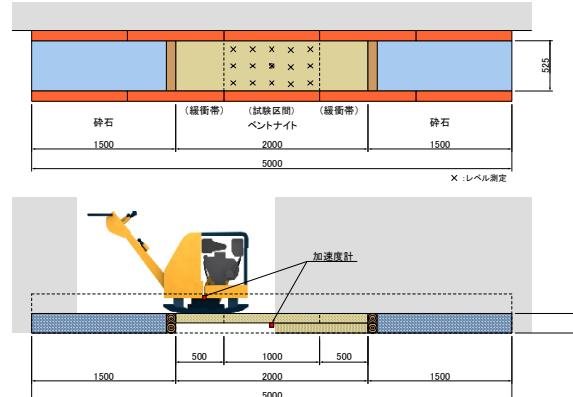


図-10 締固め機械による基礎実験概要図

Fig.10 Outline of basic experiment with vibratory compactors

$$F_0 = \frac{2mr\omega^2}{g} \quad (1)$$

ここに, $\omega = 2\pi f$ F_0 : 起振力 m : 偏芯錘質量 r : 偏芯距離 ω : 円振動数 f : 振動周波数

振動コンパクターの標準スペックは、起振力 $F_0=46\text{kN}$ であるが、起振力 $F_0=15\sim53\text{kN}$ の範囲で 16 ケースの比較実験を行った。振幅のパターン A～D は、A（大）～D（小）の関係になっており、振動周波数と起振力の関係は図-9 のようになる。締固め実験は図-10に示すように幅 525mm、長さ 2000mm 区間（測定区間 1000mm）で、2 層目を改造設定パターン 16 ケースについて行った。16 ケースの実験結果について、転圧回

数と乾燥密度の関係を図-11、転圧時間と乾燥密度の関係を図-12に示す。図-11より、パターンDの45Hzの場合は、初期の段階(1~3パス)での乾燥密度の増加が顕著であるが、転圧回数を追うごとに乾燥密度の増加割合が低下していく傾向にある。一方、パターンAの65Hz, 70Hzの場合、初期の段階(1~3パス)での乾燥密度の増加量はあまり大きくないが、転圧回数を追うごとに乾燥密度の増加割合が増加する傾向にある。これらの特徴は、図-12ではさらに顕著で、パターンDの45Hzは初期段階で乾燥密度の増加が大きく、パターンAの65Hz, 70Hzは転圧時間の経過に従って乾燥密度の増加量が大きくなっている。

以上の結果から、締固めの初期の段階では、出来るだけ小さい振幅Y起振力 F_0 および最適振動周波数 f_{opt} を用いて締固めを行い、ある程度粒子密度が増加した段階でもう少し大きな起振力 F_0 と最適振動周波数 f_{opt} にて締固めを行う方法が合理的で効率的な締固め方法に繋がることが示唆された。

2.3 3Step 締固め工法による締固め実験

2.3.1 締固め実験(その1)

振動特性基本実験では、撒き出し直後の初期段階での最適振動周波数が $f_{opt}=40\text{Hz}$ であることを確認した。さらに振動コンパクターを用いた締固め基礎実験により、締固め初期の段階では小さい振幅Y、起振力 F_0 にて締固め、段階的に大きくする方が効果的であることが示唆された。過大な力を与えると、粒状ベントナイトが変形するため、締固め初期の段階では極力接地圧を小さくし、締固めの進行に伴い徐々に増加させる。また、最適振動周波数 f_{opt} を粒状体の締固めの状況(粒状密度)に応じて最適値を選定し締固めを行う方法が効果的であると考えた。そこで、図-13に示す「効率的締固めプロセス」(3Step締固め工法)を考え、締固め実験にて妥当性の検証を行った。

締固め実験は、余裕深度処分埋設施設(L1施設)の低透水層(ベントナイト系材料)のうち側部緩衝材の施工を模擬した幅1000mm、長さ4000mm区間(測定期間2000mm)の試験ピット(図-14)で実施した。実験ケースを表2に示す。表中に、当社で過去に実施した従来工法(振動コンパクター(標準機)および小型振動ローラー)と開発技術との比較を行った。開発技術では、Step2での改造振動コンパクターを振幅Y、起振力 F_0 の大きいパターンAと振幅Y、起振力 F_0 の小さいパターンDで比較し、Step2における最適振動周波数 f_{opt} 領域を調べるために振動周波数を $f=40\text{Hz}$ と $f=70\text{Hz}$ で比較した。

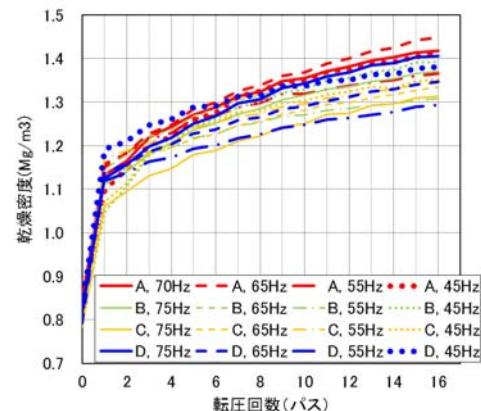


Fig.11 転圧回数と乾燥密度の関係
Relationship between number of passes and dry density

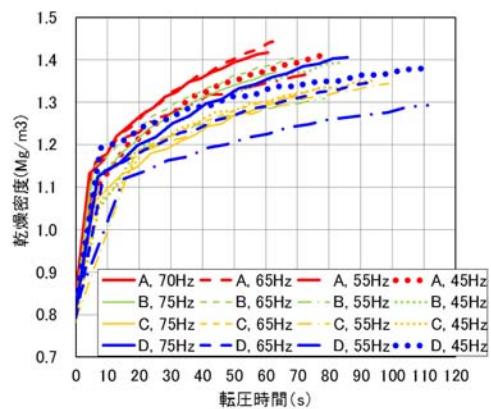


Fig.12 転圧時間と乾燥密度の関係
Relationship between time required for compaction and dry density

<効率的締固めプロセス> (3Step締固め工法)

Step1: 極めて小さい起振力 F_0 、接地圧 p で最適振動周波数 f_{opt} による振動成形機を用いて締固め。



Step2: 比較的小さい起振力 F_0 、接地圧 p で最適振動周波数 f_{opt} による改造振動コンパクターを用いた締固め。



Step3: 極めて大きい起振力 F_0 、接地圧 p で小型振動ローラーを用いた圧縮締固め。



Fig.13 Step1～Step3に使用した締固め機械

Fig.13 Vibratory compactors used for compaction from Step 1 to Step 3

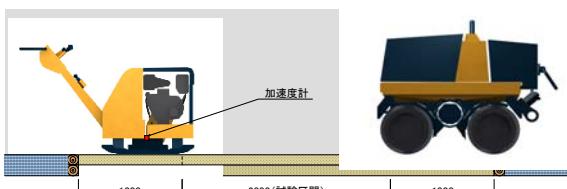
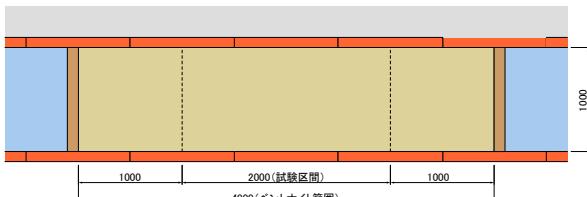


図-14 3Step 締固め工法実験概要図
Fig.14 Outline of experiment for 3-Step Compaction

2.3.2 実験結果（その1）

実験状況を図-15に示す。材料の撒き出しは人力で行い、Step1の「振動成形機」は、2基の振動モーターにより構成され、ワインチで牽引した。実験結果について、転圧回数と乾燥密度の関係を図-16に、転圧時間と乾燥密度の関係を図-17に示す。表-1に示すように、従来工法は撒き出し直後から小型振動ローラー（TR）単体、もしくは振動コンパクター標準機（PC）単体で締固めを行った。一方、本開発技術はCASE1～CASE3でStep2の振動コンパクターの振幅パターン（AもしくはD）、振動周波数fおよび転圧回数nの組み合わせを変えたものである。「3Step 締固め工法」は従来の技



図-15 実験状況（Step1～Step3）
Fig.15 Experimental compaction from Step 1 to Step 3

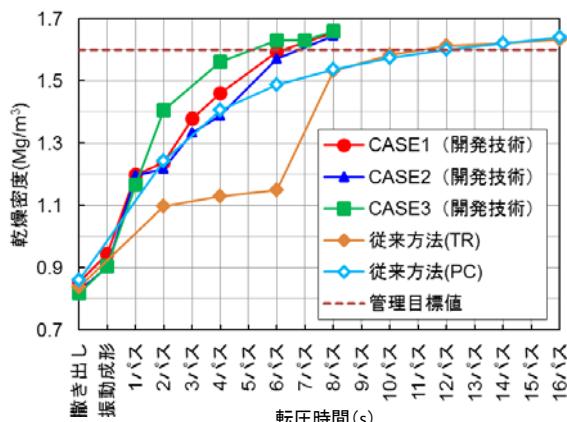


図-16 転圧回数と乾燥密度の関係
Fig.16 Relationship between number of passes and dry density

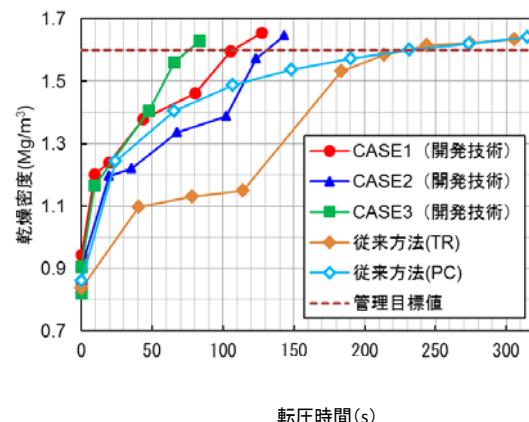


図-17 転圧時間と乾燥密度の関係
Fig.17 Relationship between time required for compaction and dry density

表-1 実験ケース
Table 1 Experimental test cases

ケーズ名	仕上り度	締固めステップ		
		1	2	3
1 CASE1(開発技術)	100mm	人力敷均し ・ 振動成形機	改造振動コンパクタ パターンA-40Hz 1～4/パス	小型振動ローラ 振動 5～8/パス
2 CASE2(開発技術)			改造振動コンパクタ パターンD-40Hz 1～4/パス	小型振動ローラ 振動 5～8/パス
3 CASE3(開発技術)		改造振動コンパクタ パターンA-70Hz 1～2/パス	小型振動ローラ 振動 3～6/パス	
4 従来方法(TR)		小型振動ローラ 無振動 1～6/パス	小型振動ローラ 振動 7～12/パス	
5 従来方法(PC)		振動コンパクタ 1～12/パス		

術と比較して大幅に締固め効率が向上しており、CASE3 (Step2 : パターン A-70Hz, 1~2 パス) の場合、6 パスで目標乾燥密度を達成し、締固め効率が従来の 2 倍（転圧パス数 50%, 転圧時間 40%）を達成することができた⁵⁾。図-16, 図-17 に示す乾燥密度 ρ_d は、各パス毎に締固め後の天端の高さを 15 ケ所測定したもので、ピット内の実験範囲における平均の乾燥密度である。また、締固め後のコア抜き試料を採取し、各試料の上部、中部、下部に分けて示した乾燥密度の度数分布について開発技術の結果を図-18 に示し、従来工法（振動コンパクター (PC), 小型振動ローラー (TR)）については同様に図-19 に示す。なお、締固め後のコア抜き試料の上部、中部、下部の乾燥密度の分布を図-20 に示す。図-19 より、従来工法に比べ、当開発技術は上部から下部の密度分布が比較的小さく、下部層の乾燥密度が比較的大きめの値を示していた。また図-20 より、当開発技術 (CASE1~3) における乾燥密度 ρ_d のバラツキの範囲は従来工法に比べて小さいことが確認できた⁶⁾。

2.3.3 締固め実験（その 2）

締固め実験（その 1）では、Step1 の振動成形機の最適振動周波数は $f_{opt}=40\text{Hz}$, Step2 の改造振動コンパクターの最適振動周波数は $f_{opt}=70\text{Hz}$ の場合最も効率的であることが判った。Step2 については、振動コンパクターの振幅 Y, 振動周波数 f を実験により比較し、ほぼ最適と考えられる起振力 F_0 を選定することができた。ここで、Step1 について、振動特性基本実験から最適振動周波数が $f_{opt}=40\text{Hz}$ であることが判っているが、振幅 Y, 接地圧 p の影響についてはまだ検証を行っていない。そこで、本実験では Step1 の振動成形機の重量を変えることにより生じる振幅 Y の差および接地圧 p が締固めに及ぼす影響を調べることとした。実験ケースを表-2 に示す。実験では、Step2 の振動コンパクターの振動周波数が異なるケースについて、Step1 の振動成形機の重量 W が 1.5 倍異なる CASE1, 2 および 2 倍異なる CASE3, 4 による比較実験を行った。側部低透水層を模擬し、図-21 のように H 鋼 ($H-300 \times 300$) を設置したピットにて、幅 1000mm, 長さ 8000mm 区間（測定区間 6000mm）の締固め実験を実施した。

Step2 は、幅 1000mm の締固め 1 パスを一度で施工できるように改造振動コンパクターを 2 台連結して締固めを行った。また、実験では全ての工程を機械施工で行うことを模擬し、粒状ベントナイトの撒き出し用に改造したアスファルトフィニッシャーを使用し、Step1 の振動成形機を牽引する機構とした。

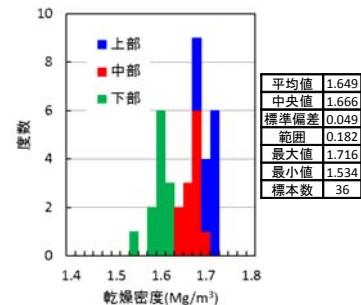


図-18 乾燥密度 ρ_d 一度数 n の関係（開発技術）
Fig.18 Frequency distribution of dry density achieved by proposed method

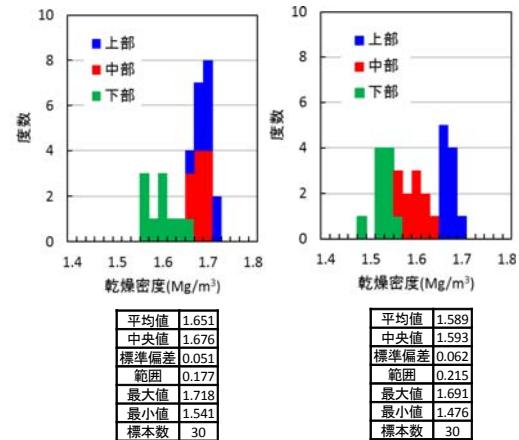


図-19 乾燥密度 ρ_d 一度数 n の関係（従来方法）
Fig. 19 Frequency distribution of dry density achieved by previous method

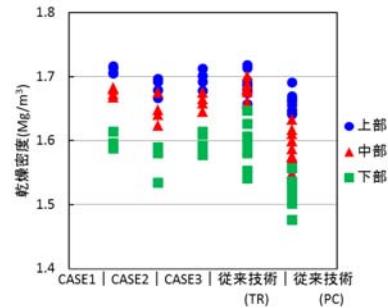


図-20 コア抜き採取試料の乾燥密度 (ρ_d)
Fig.20 Dry density measured in drilled core samples

表-2 実験ケース（その 2）

Table 2 Experimental test cases Part 2

CASE	仕上がり 厚さ (mm)	Step1 振動成形機 (撒き出し時)			Step2 振動コンパクタ [*] (1, 2 パス)	Step3 小型振動ローラ (3 パス以降)
		振動数 (Hz)	重量 (kg)	接地圧 (kN/m ²)		
1			58	1.8	A-45	8 パス
2	100	40	87	2.8	A-45	12 パス
3			65	2.1	A-70	8 パス
4			127	4	A-70	12 パス

*振動コンパクターは走行速度調整(高速:1バス・低速:2バス)をして締固め

2.3.4 実験結果（その 2）

実験状況を図-22 に示す。改造アスファルトフィニッシャーで材料を撒き出すと同時に Step1 の「振動成形機」を 0.5m/min の速度で牽引して締固めを行った。転

圧回数と乾燥密度の関係を図-23に、転圧時間と乾燥密度の関係を図-24に示す。本実験から、以下のことが判った。

- ◇ Step2 のパターン A-40Hz の場合、CASE1 は 8 パスで目標乾燥密度を達成し、CASE2 は 12 パスを要した。
- ◇ Step2 のパターン A-70Hz の場合、CASE3 は 8 パスで目標乾燥密度を達成し、CASE4 は 12 パスを要した。
- ◇ CASE1 と CASE3 を比較すると、CASE3 の方が 2 パス目終了時点（Step2 終了時点）で若干乾燥密度が大きくなっているが、Step3 では CASE1 の方が乾燥密度の増加勾配が大きく、目標乾燥密度の達成も若干早い（6~8 パスの間）傾向を示した。
- ◇ CASE1（Step2 の $f_{opt}=40Hz$ ）と CASE3（Step2 の $f_{opt}=70Hz$ ）の転圧パス数がほぼ同じ（8 パス）ことから、振動成形機の重量が軽い（接地圧が小さい）ことは締固め効率の向上への影響が大きく、振動成形機の接地圧が 1.5~2 倍（CASE2, 4）になると締固め効率が低下することが判った。
- ◇ 転圧時間への影響は、Step2 の振動周波数 f の影響が大きく、CASE3 の方が CASE1 より転圧時間が短く、また CASE4 の方が CASE2 より転圧時間が短くなることが判った。

以上より、Step1 では振動成形機の接地圧を極力小さく（軽量化）し、最適振動周波数 $f_{opt}=40Hz$ で締固め、Step2 では振動コンパクタの標準仕様より大きな振幅 Y、起振力 F_0 と最適振動周波数 $f_{opt}=70Hz$ で締固める方法が最も効率的な組み合わせであることが判った。締固め実験（その1）、（その2）について本研究の成果を表-3 および図-25 に示す。

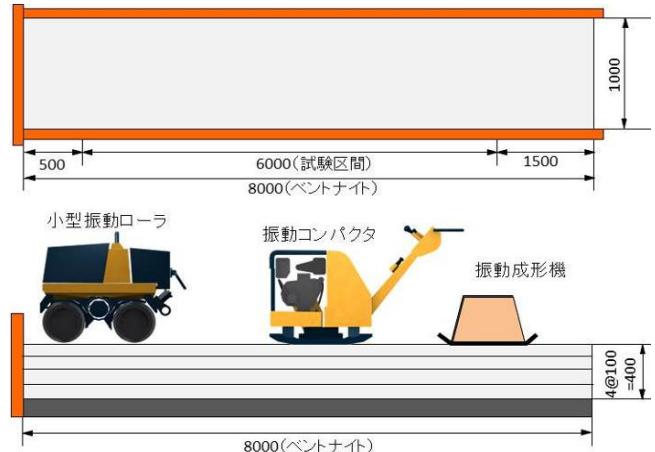


図-21 締固め実験（その2）概要図
Fig.21 Outline of compaction test Part 2



図-22 実験（その2）状況（Step1～Step3）
Fig. 22 Experimental compaction Part 2 from Step 1 to Step 3



図-23 転圧回数と乾燥密度の関係（実験その2）
Fig. 23 Relationship between number of passes and dry density Part2

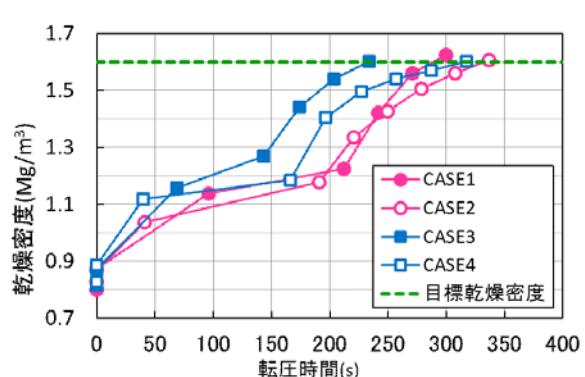


図-24 転圧時間と乾燥密度の関係（実験その2）
Fig. 24 Relationship between time required for compaction and dry density Part2

表-3 本研究の成果（実験1,2）
Table 3 Results of the study Parts 1 and 2

ケース名	仕上り度	締固めステップ			目標乾燥密度達成時 転圧回数 転圧時間*
		1	2	3	
当社開発技術 (実験その2)	100mm	改造フィニッシャ敷均し 振動成形締固め・接地圧2.1kN/m ²	改造振動コンパクタ パターンA-70Hz 1~2パス	小型振動ローラ 振動 3~8パス	8パス 59秒
当社開発技術 (実験その1)		人力敷均し 振動成形締固め・接地圧1.8kN/m ²	改造振動コンパクタ パターンA-70Hz 1~2パス	小型振動ローラ 振動 3~6パス	6パス 84秒
従来工法 (小型振動ローラ)		人力敷均し		小型振動ローラ 無振動 1~6パス	12パス 244秒
従来工法 (振動コンパクタ)				振動コンパクタ 1~12パス	12パス 232秒

*転圧時間はすべて2.0m区間の累計時間に換算した値

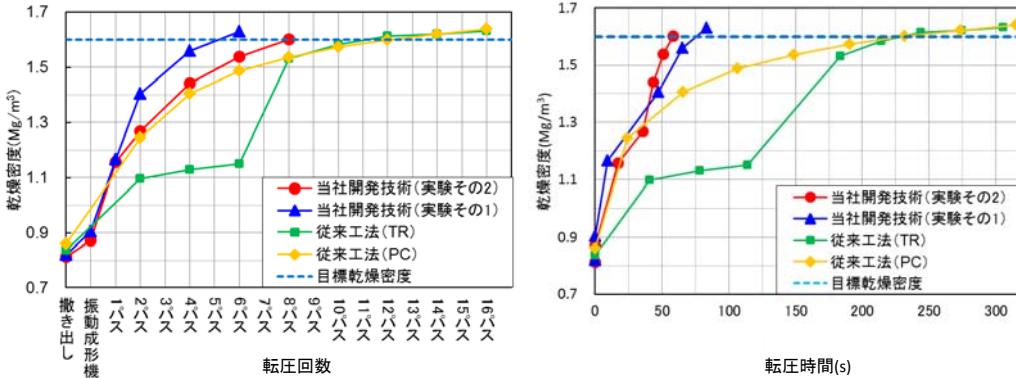


図-25 本研究の成果（実験1,2）
Fig.25 Results of the study Parts 1 and 2

3. まとめ

本研究では、余裕深度処分埋設施設（L1施設）における低透水層（ベントナイト系材料）の施工技術として、粒状ベントナイトの効率的締固め技術を目的とした基礎実験および締固め実験を行った。その結果、粒状ベントナイトの振動特性を利用した合理的締固め技術「効率的締固めプロセス」（3Step 締固め工法）を開発した。実施工では、工期短縮による大幅なコストダウン効果と品質向上効果が期待できると考えている。今後は、当開発技術で得られた成果において、以下の課題についてさらなる検討を進めていく予定である。

- ・ 本開発技術の成果について理論的知見からの妥当性の検証を行う。
- ・ 当締固めプロセスにおける締固め密度の変化を振動加速度波形特性から管理できるシステムを検討する。
- ・ 本開発技術の成果について施工マニュアルの作成を視野に入れた標準化を作成する。

なお本研究の成果は、応用技術として不溶化処理造粒材などの埋め立て技術へ水平展開できると考えられ、東日本大震災における放射性廃棄物処分への応用技術に繋がると期待している。

参考文献

- 1) (社) 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会、余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理及び検査の考え方、2009.
- 2) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分にかかる安全規制について、廃棄物安全小委員会（第32回）資料5-2、2008.
- 3) (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター、平成20年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書（第1分冊）、2009.
- 4) 白瀬光泰、森川義人、根木政広、木ノ村幸士、藤原齊郁、月本行則：粒状ベントナイトの効率的締固め技術の開発（その1）、土木学会第67回年次学術講演会、2012.
- 5) 根木政広、森川義人、白瀬光泰、木ノ村幸士、立石洋二、月本行則：粒状ベントナイトの効率的締固め技術の開発（その2）、土木学会第67回年次学術講演会、2012.
- 6) 森川義人、根木政広、白瀬光泰、木ノ村幸士、藤原齊郁、月本行則：粒状ベントナイトの効率的締固め技術の開発（その3）、土木学会第67回年次学術講演会、2012.