

# 原位置締固め工法による ベントナイト系緩衝材施工技術の実証的検討

増田良一<sup>1</sup>・朝野英一<sup>2</sup>・雨宮清<sup>3</sup>・茂呂吉司<sup>4</sup>・小菅一弘<sup>5</sup>・小峯秀雄<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 (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)  
E-mail: masuda@rwmc.or.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 (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>工博 東北大学大学院教授 バイオロボティクス専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)

<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)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において廃棄物周辺に設置されるベントナイト系緩衝材の施工技術の開発は、人工バリアとしての緩衝材の性能を左右する重要な技術課題である。筆者らは、緩衝材の施工方法のひとつである内型枠方式の原位置締固め工法について、実際の処分孔と寸法法のコンクリートピットおよび遠隔操作を前提に設計された施工システムを模擬した締固め装置を用い、実規模での緩衝材の締固め試験を実施した。その結果、内型枠方式の原位置締固め工法により要求される仕様・品質の緩衝材の施工が可能であること並びに一連の施工作业において機械構造的な問題が生じないことを確認し、本施工方法で実規模の緩衝材施工に対応できる見通しを得ることができた。

**Key Words :** bentonite, buffer, in-situ compaction method, remote operation, high-level radioactive waste disposal

## 1. はじめに

原子力発電で発生した使用済み燃料を再処理することで生成される廃液をガラス固化した高レベル放射性廃棄物（以下、HLWと称す）は、地下300m以深の岩盤内に埋設する地層処分が計画されている。図-1にHLWの地層処分の概念を示す。緩衝材は、ガラス固化体を封入したオーバーパック（以下、本検討では廃棄体と称す）の周辺に構築される人工バリアであり、バリア周辺の力学的変動に対する緩衝性、低透水性、核種収着性により核

種移行遅延機能等を発揮し、数万年以上の長期にわたる安全確保が要求される地層処分の確実性・信頼性の向上に寄与する。緩衝材が人工バリアとして確実に機能を発揮するためには、要求される仕様・品質を満足する緩衝材を構築する施工技術の開発が不可欠である。

緩衝材は、ベントナイト単体もしくはベントナイト・ケイ砂混合材料を高密度に圧縮したものが有望であると考えられ、その施工方法は、大きくは材料の圧縮・加工を地上施設内で行う方法と、これらの作業を地下坑道内の処分原位置で行う方法に区分できる。前者については

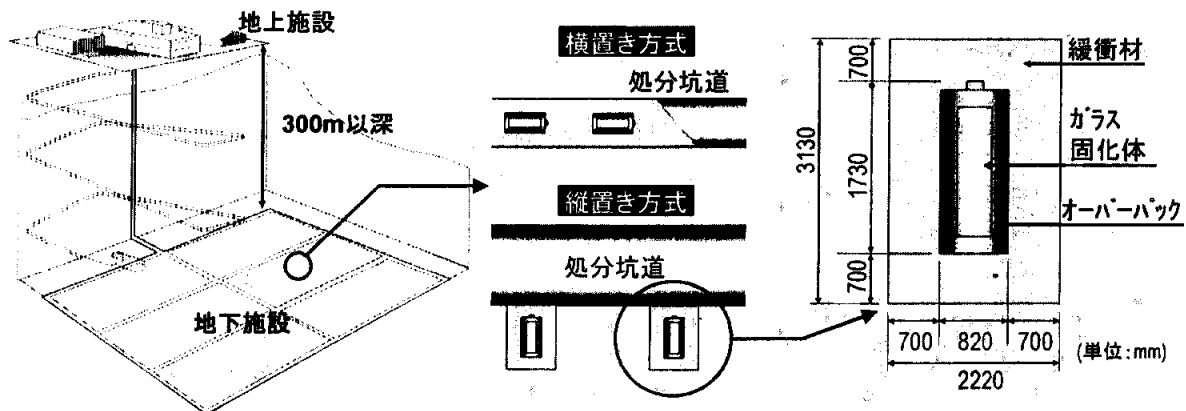


図-1 高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念

ベントナイトブロック方式、後者については原位置締固め工法が代表的な施工方法である。本検討で検討対象とする原位置締固め工法は、廃棄体を定置する処分孔内で材料の締固めを行う技術である。土質材料の締固め技術を基盤とする施工技術であり、材料圧縮に大容量プレス等を必要としないため比較的軽微な設備で対応可能であること、岩盤と密着した緩衝材の施工が可能であり、岩盤-緩衝材間に生じる隙間に起因する諸問題を排除できることなどの優位性を有する。

原位置締固め工法の開発状況について以下に整理する。材料となるベントナイト単体およびベントナイト・ケイ砂混合材料の締固め特性については、室内～実規模レベルの幅広いスケールで締固め試験が実施され、締固めエネルギーおよび緩衝材仕様と締固め特性の関係の定量化等の観点により、データ整備が進められている<sup>1)2)</sup>。また、締固めの衝撃による周辺岩盤・廃棄体の損傷に対する衝撃影響評価手法の研究も実施されている<sup>3)</sup>。本工法による実規模での施工試験の実績については、核燃料サイクル開発機構による釜石鉱山におけるランマを用いた施工<sup>4)</sup>や、小野らによる実規模締固め装置を用いた締固め試験<sup>5)</sup>が実施されている。

一方、今後対応すべき課題として、遠隔操作を念頭に置いた施工システムの構築が挙げられる。緩衝材の施工作業を行う処分坑道内は、放射性廃棄物を取り扱うことから管理区域として区分され、厳密な放射線管理が行われる。処分坑道内での人間による直接的な施工作業は避けるべきであり、遠隔操作を前提とした緩衝材施工システムが要求される可能性がある。そのためには、施工システムを極力自動化、単純化することが望ましく<sup>6)</sup>、それらを考慮した施工システムが検討されている<sup>7)</sup>。しかし、その検討において構築された施工システムは、要素レベルの知見を組み合わせて構築されていることから、個々の知見からは把握が困難なシステムとしての問題が

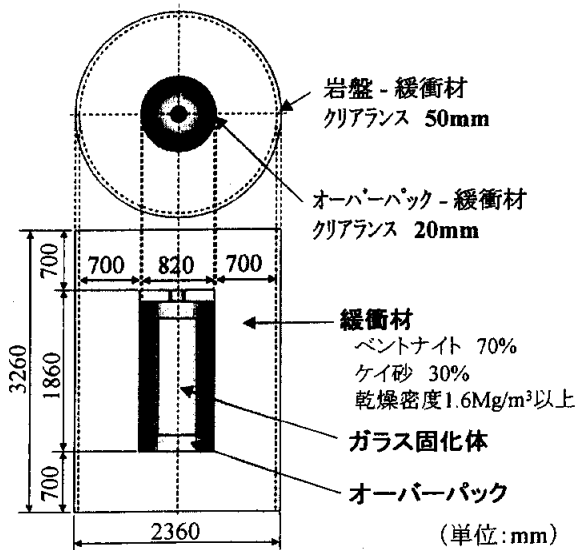


図-2 施工目標とする緩衝材の仕様

内在している可能性もあり、本工法の緩衝材施工に対する適用性の提示は十分ではない。

本報告は、実際の処分孔と同寸法のコンクリートピットおよび遠隔操作を念頭に置き構築された施工システムを模擬した締固め装置を用いて実規模締固め試験を実施し、原位置締固め工法の緩衝材施工に対する適用性を実証的なアプローチにより検討した結果を報告するものである。

## 2. 試験方法

### (1) 試験の位置付け、目的

本試験は、実際の緩衝材施工を模擬した実規模締固め試験を実施したものであり、本工法の緩衝材施工に対する適用性の確認を目的とする。試験に用いた締固め装置は、原子力環境整備促進・資金管理センターによる「遠隔操作技術高度化調査」で示された原位置締固め工法による緩衝材施工システム<sup>7)</sup>に基づき設計されたものであり、実際の施工システムと同じ寸法および基本動作で緩衝材の締固めが可能である。本締固め装置を用いた締固め試験により施工される緩衝材の品質、施工作業上の問題等の確認を行い、その結果から、本施工方法の緩衝材施工に対する適用性の評価を行うものである。

### (2) 施工目標とする緩衝材の仕様

初めに、施工目標とする緩衝材の仕様を整理する。緩衝材の仕様は、処分サイトの地質条件、オーバーバックの仕様等に依存する設計項目を含むことから現時点では決定していないが、既往の検討において、いくつかの設計例が示されている。本検討では、核燃料サイクル開発機構による「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」（以下、JNC第2次とりまとめと称す）において示された緩衝材仕様例<sup>8)</sup>を参考に、図-2に示した仕様の緩衝材を施工上の目標仕様として設定した。使用する材料は、ベントナイトに乾燥質量比で30%のケイ砂を混合した材料（以下、ベントナイト・ケイ砂混合材料と称す）である。乾燥密度については、JNC第2次とりまとめでは $1.6 \text{ Mg/m}^3$ が設定されているが、ここでは施工目標を緩衝材全体で平均 $1.6 \text{ Mg/m}^3$ 以上とし、締固め試験においては、各層毎に平均 $1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ の範囲の緩衝材の施工を想定して試験条件の設定を行うものとした。緩衝材の厚さは、外周の隙間部を除き700mmとした。また、廃棄体定置方向については、図-1に示したように2通りの定置概念が検討されているが、坑道内における横方向からの締固め作業の困難性から、縦置き方式を検討対象とした。

### (3) 前提とする施工方法

原位置締固め工法による緩衝材施工の手順は、材料へのエネルギーの与え方、廃棄体を収納する空間（以下、廃棄体挿入孔と称す）の構築方法等により、複数の手順が検討されている<sup>7)</sup>。本節では、本検討で前提とする施工手順、施工方法を整理する。

#### a) 締固め方法

材料の締固め方法は、大きくは動的、静的締固めに区分できる。このうち、静的締固めについては、乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3$ 以上まで圧縮するために $6\text{MN}$ 以上の力が必要であり<sup>9)</sup>、坑道内での反力確保の問題から現時点における実現可能性は低いと考えられる。そのため、現在は動的締固めを中心に検討が進められている。

ベントナイト・ケイ砂混合材料の動的締固めについては、特徴的な締固め特性として、締固めが可能な乾燥密度の上限が1打撃あたりの締固めエネルギー（以下、打撃エネルギー $E_{\text{imp}}$ と称す）に依存することが示されている<sup>1)</sup>。土質材料の締固めでは総締固めエネルギーによる施工管理が一般的であるが、本材料の場合は、打撃エネルギーにより乾燥密度の上限が規定されるため必要な打撃エネルギーの確保が重要であり、 $1.6\text{Mg/m}^3$ の乾燥密度を得るためには大きな打撃エネルギーの確保が必要である<sup>1)</sup>。前述の緩衝材施工システムの設計<sup>7)</sup>では、この要求を満たす締固め方法として、重錘落下式の動的締固めが採用されている。重錘落下式は、重錘質量、落下高さの変更により打撃エネルギーの調整・管理が容易であることに加え、締固め時に反力を確保する必要が無く、複雑な機械構造を必要としない。単純化が望ましい緩衝材施工において適用性の高い締固め方法と考えられる。なお、打撃エネルギーと得られる乾燥密度の定量的な関係については後述する。

#### b) 廃棄体挿入孔の構築方法

廃棄体挿入孔の構築方法については、模擬廃棄体（内型枠）を設置して周辺を締固める内型枠方式および締固め後に廃棄体挿入孔を削孔する削孔方式等が検討されている<sup>7)</sup>。削孔方式については、別途実施した $\phi 200\text{mm}$ ボーリングマシンを用いた予備削孔試験において孔口付近の品質維持が困難であったため、本検討では内型枠方式を採用するものとした。図-3に試験の前提とした緩衝材

施工手順を示す。

### (4) 試験における評価項目

緩衝材施工方法としての適用性を評価するにあたり、本試験では、大きく分けて2つの点に着目するものとした。着目した点は、施工目標とする仕様・品質の確保の可否および締固め装置の一連の施工作業における機械構造的な問題の有無である。表-1に本試験における着目点並びに測定・確認項目を整理する。それぞれの内容について、以下に整理する。

#### a) 緩衝材仕様・品質に関する評価項目

緩衝材仕様・品質の評価については、要求される仕様・品質の緩衝材施工の可否の観点からの緩衝材施工技術としての適用性判断を目的とする評価項目である。

緩衝材施工における品質管理に関する検討<sup>10)</sup>において、緩衝材に要求される機能を確保するための品質管理項目として、「乾燥密度」「ベントナイト含有率」「含水比」「寸法」の4項目が抽出されている。これらは、各作業段階において必要に応じて管理が行われるが、このうち、材料の締固めの段階において管理が必要な項目は、「乾燥密度」および「寸法」の2項目である。

「乾燥密度」に関する要求要件は、(2)節において施工目標仕様として設定した、緩衝材全体で平均 $1.6\text{Mg/m}^3$ 以上の乾燥密度の確保である。土質材料の締固めでは、材料全体に均一なエネルギーを作用させることは困難であり、施工上、空間的な密度分布が生じることは避けられないが、緩衝材の性能を評価する場合には、ベントナイトの膨潤による隙間の閉塞、密度の均質化に期待し、施工上生じる密度差や隙間の存在を考慮せず、緩衝材全体の平均乾燥密度で論じられる場合が多い。本検討で実施する締固め試験では層毎に締固め条件を変えることから、試験により施工される緩衝材全体の平均乾燥密度は大きな意味を持たないため、ここでは各層毎の平均乾燥密度で評価を行うものとし、各層において平均 $1.6\text{Mg/m}^3$ 以上の乾燥密度の確保を要求要件として設定するものとした。以下、本報告中では特別の断りが無い場合、「乾燥密度」は各層毎の平均乾燥密度を指すものとする。

一方、施工上生じる初期の緩衝材の密度の不均一性については、性能評価上の前提条件として、膨潤により全体が均質な状態となる必要がある。しかし、緩衝材の膨

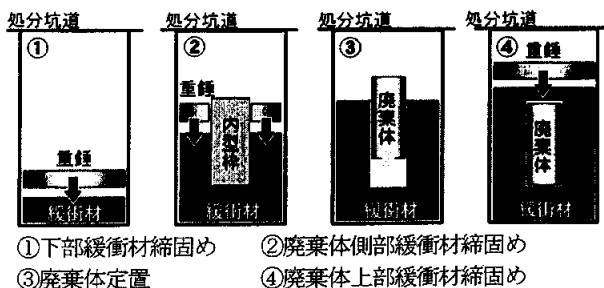


図-3 原位置締固め工法の施工手順例

表-1 試験における着目点と評価項目

着目点	評価項目
①緩衝材仕様・品質	I. 締固め層毎の平均乾燥密度 II. 施工された緩衝材の空間的な密度分布 III. 廃棄体挿入孔の自立性、寸法確認
②機械構造的な問題	IV. 締固め機構の動作確認 V. 内型枠耐久性(衝撃による損傷防止) VI. 内型枠の荷重解放機構の動作確認

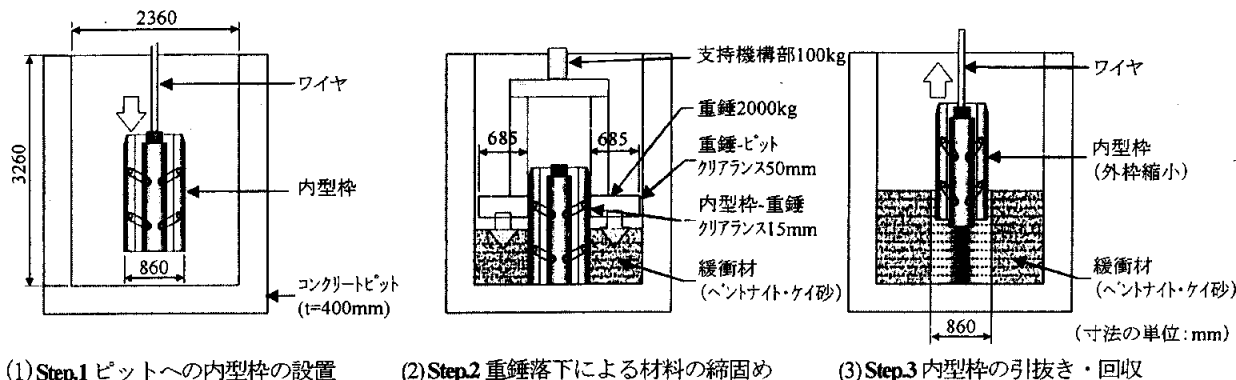


図-4 実規模原位置締固め試験の手順

潤に伴う均質化の評価は容易でなく、初期の緩衝材に許容される密度分布の程度や範囲は明示されていない。従って、施工上発生する密度分布については、バリアとしての品質の可否を判断する定量的な評価指標の設定は困難であるが、定性的には初期の状態での均質性の高い緩衝材の方が、性能評価の前提に近い状態を提供可能であることから評価の信頼性の点で望ましく、施工により生じる緩衝材の空間的な密度分布の程度や傾向は、複数の施工技術間の相対的な比較・評価を行う場合の評価材料のひとつと成り得るものである。このことから、本試験では、原位置締固め工法により施工される緩衝材の密度分布の程度、傾向の把握を目的に、乾燥密度の空間的な分布について測定を実施するものとした。

もうひとつの管理項目である「寸法」については、原位置締固め工法の場合、緩衝材底部および側部は処分孔により拘束されることから、管理が必要となるのは緩衝材上部（緩衝材高さ）並びに廃棄体挿入孔の寸法である。緩衝材高さについては、緩衝材の仕上がり層厚の管理が必要であるが、乾燥密度は層厚と材料投入量により管理可能であることから、層厚と乾燥密度の管理は同義である。廃棄体挿入孔の寸法については、廃棄体の収容に対して障害とならない内空形状を確保する必要があり、廃棄体挿入孔の内壁の自立性並びに内空寸法を評価の対象として設定した。

#### b) 機械構造的な問題に関する評価項目

機械構造的な問題の評価については、一連の締固め作業における機械動作・構造に起因する問題の把握を目的とした評価項目である。特に、今回の試験において注目するのは、内型枠方式による廃棄体挿入孔構築技術の適用性である。本技術は、締固めによる衝撃、圧力が作用する緩衝材の中央に装置が設置されることから、装置の耐圧性、対衝撃性の確保や、外周に圧力が作用した状態からの装置回収機構の動作などが問題になる。本試験では、実際の緩衝材施工とほぼ同じ衝撃・圧力を作用させ、実証的にこれらの問題について確認を行った。

#### (5) 試験方法

##### a) 試験装置

実規模原位置締固め試験の手順を図-4に示す。また、図-5に締固め装置（重錘＋支持機構部）、図-6に内型枠の構造を示す。

試験方法を以下に示す。実際の処分孔を模擬した内径2360mm、深さ3260mmの円形コンクリートピットの中央に内型枠を固定し（図-4-(1) Step.1）、ピット内で敷き均しを行ったベントナイト・ケイ砂混合材料を重錘落下により動的に締固めた（図-4-(2) Step.2）。重錘は、中心角20°の扇型の鋼製重錘を左右対称に取り付けたものであり、上部に軸を固定する支持機構部が接合されている。重錘部の質量が2000kg、支持機構部の質量が100kg、全体で2100kgの質量を有し、ワイヤにより設定した高さまで重錘を吊り上げ、自由落下させることで材料を締固める。重錘は160°の範囲で回転する機能を有し、20°単位で自動的に回転させ、全断面に対して締固めを行う。緩衝材に接触する重錘の面積は1900cm<sup>2</sup>×2体で3800cm<sup>2</sup>である。重錘-コンクリートピット側壁のクリアランスは50mm、重錘-内型枠のクリアランスは15mmとした。コンクリートピットの中心に設置する内型枠は、締固め時の衝撃による変形が生じないよう耐圧性を考慮して設計した外径860mmの円筒形の鋼製型枠である。締固め後には緩衝材から作用する圧力により回収が困難になるものと予想されることから、外枠の外径を縮小し、緩衝材から作用する圧力を解放する機能を有する。締固め終了後に内型枠の外径を縮小し回収することで、廃棄体挿入孔が構築される（図-4-(3) Step.3）。

##### b) 使用材料

試験で用いた材料の仕様を表-2に示した。ベントナイトは、膨潤性に優れ、高いバリア性能が期待できるNa型ベントナイトを用いるものとし、今回の試験では、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（クニゲルV1）を使用した。混合するケイ砂については、3,4(S,L),5,6,7号ケイ砂を乾燥質量比で均等に混合したものを使用した。それぞれの材料の粒径加積曲線を図-7に示す。

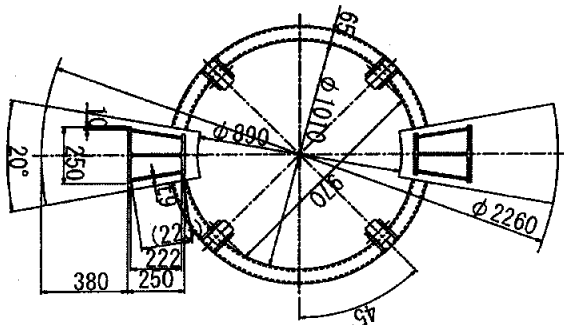
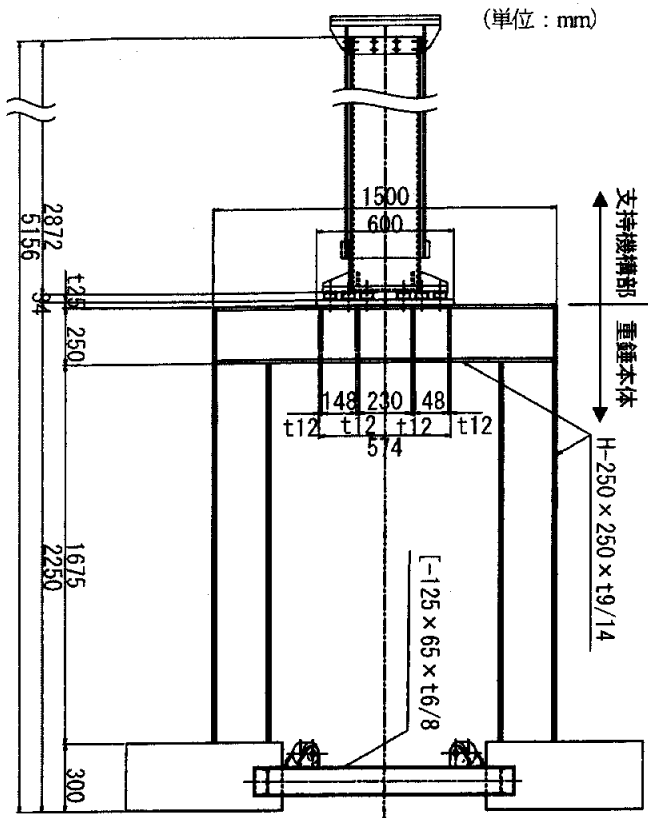


図-5 締め装置(重錘+支持機構部)の構造

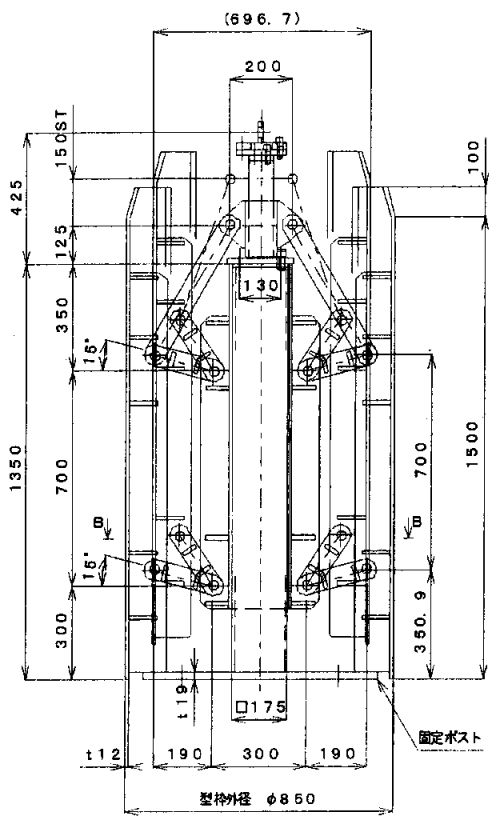
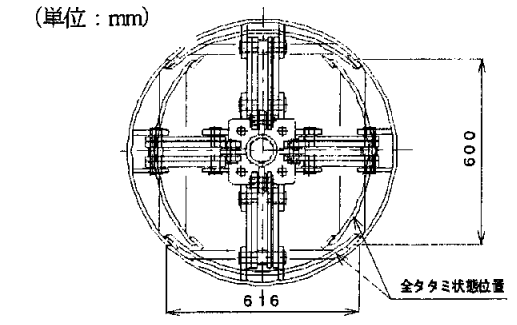


図-6 内型枠の構造

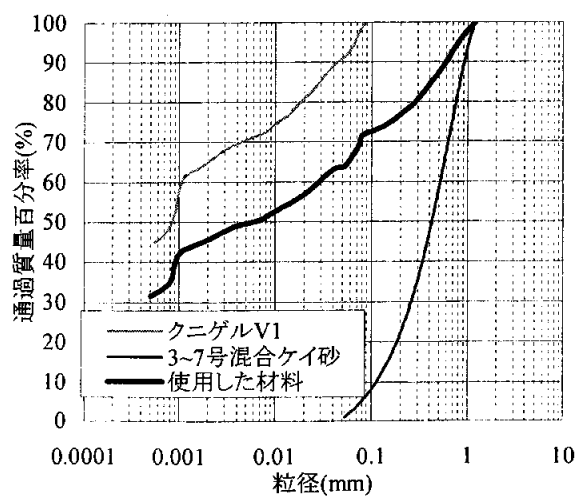


図-7 使用材料の粒径加積曲線

表-2 使用した材料の仕様

項目	仕様
ベントナイト種類	Na型ベントナイト (クニゲルV1 / モノリナイト含有率 59%)
ケイ砂種類	3, 4(S, L), 5, 6, 7号ケイ砂混合 (乾燥質量比で均等配合, 4号については粒径の異なる4号Sと4号Lを50%の割合で配合)
ケイ砂混合率	30% (乾燥質量比)
含水比	w=15% (目標)
養生時間	材料混合・調湿後 24時間以上

ケイ砂混合率は30%とした。なお、ケイ砂混合率の定義は下式のとおりである。

$$R_s = \frac{m_{sd}}{m_{bd} + m_{sd}} \times 100 \quad (1)$$

ここに、

$R_s$  : ケイ砂混合率(%)

$m_{bd}$  : ベントナイトの乾燥質量(g)

$m_{sd}$  : ケイ砂の乾燥質量(g)

含水比については、事前に実施した JIS A 1210 による締固め試験の結果を参考に設定した。締固め試験結果を図-8に示す。なお、グラフ中の  $E_c$  は "Standard Proctor" として規定される標準締固め仕事量を表し、 $1E_c = 5.51 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$  である<sup>11)</sup>。各層の乾燥密度の施工範囲を  $1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$  としたこと、最大乾燥密度として  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  が得られた時の最適含水比である  $w = 15\%$  を試験に用いる材料の含水比として設定した。

材料の混合・調湿は、所定の配合、含水比が得られるよう計量した材料を、材料混練用ミキサー（アイリッヒミキサー）により混合することで行った。

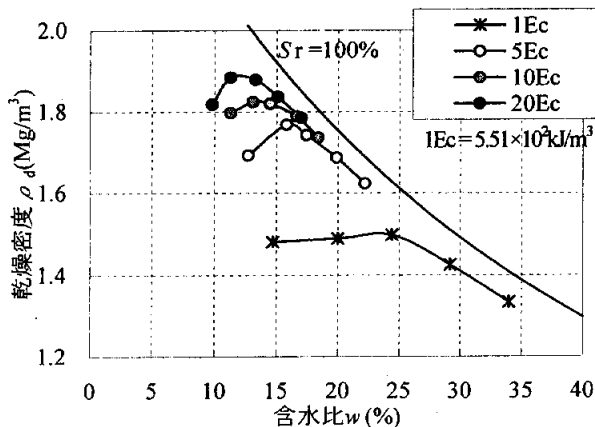


図-8 JIS A 1210による締固め試験結果

### c) 試験ケース

層毎に設定した試験ケースの一覧を表-3に示す。全12層の締固めを行うものとし、このうち、底面からの3層は装置試運転を兼ねた捨層(N1~N3層)である。S1~S9層が試験層であり、それぞれ締固めエネルギーや層厚等を変化させて、各層の条件を設定した。

締固めの層厚は、締固め特性に関するデータが取得されている条件<sup>1)</sup>である1層あたり10cm（仕上がり）を標準の層厚とし、層厚の増加に伴う乾燥密度および施工品質の変化を把握する目的で、層厚15、20cmのケースも設定した。1層あたりの材料投入量は、所定の層厚において乾燥密度  $1.6 \text{ Mg/m}^3$  となるように設定した。

次に、材料に与える打撃エネルギーについて以下に整理する。筆者らが示した打撃エネルギーと得られる乾燥密度の関係の実験式である式(2)<sup>1)</sup>により、 $1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$  の乾燥密度を得るために必要な打撃エネルギーの計算し、各層の打撃エネルギーを設定した。式中の到達乾燥密度  $\rho_{dupr}$  は、入力した打撃エネルギーにより得られる最大の乾燥密度を表す。エネルギーは、締固めを行う層（最上層）のみに作用するものと仮定した。 $1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$  の乾燥密度を得るために必要な打撃エネルギーは、式(2)より  $0.14 \sim 0.32 E_c$  であることから、本試験では  $0.1 \sim 0.4 E_c$  の範囲で打撃エネルギーの設定を行った。

$$\rho_{dupr} = 0.231 \ln E_{imp} + 2.066 \quad (2)$$

ここに、

$\rho_{dupr}$  : 到達乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )

$E_{imp}$  : 打撃エネルギー ( $E_c$ )

S6~S8層については、複数の打撃エネルギーを設定したが、これは、小さい打撃エネルギーから順次打撃エネルギーを増加させて締固めを行うことで、急激な密度上昇による材料中への空気の封入を防止し、排気性の悪さ

表-3 締固め試験ケースの一覧

層	層厚/積算 (cm/cm)	設定材料 投入量 (kg)	試験の着目点	重錘仕様・落下条件			打撃 エネルギー ( $E_c$ )	備 考
				受圧面積 ( $\text{cm}^2$ )	質量 (kg)	落下高さ (cm)		
N1	10/10	691	捨層	3800	2100	20	0.2	装置試運転
N2	10/20	691	捨層	3800	2100	30	0.3	装置試運転
N3	10/30	691	捨層	3800	2100	20	0.2	装置試運転
S1	10/40	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	20	0.2	
S2	10/50	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	15	0.15	
S3	10/60	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	30	0.3	
S4	10/70	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	30	0.3	脱気処理の実施
S5	10/80	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	40	0.4	
S6	10/90	691	$E_{imp}$ の影響	3800	2100	5, 10, 20, 30	0.05, 0.1, 0.2, 0.3	
S7	15/105	1037	層厚の影響	3800	2100	15, 30	0.1, 0.2	
S8	20/125	1383	層厚の影響	3800	2100	20, 40	0.1, 0.2	
S9	10/135	691	表層仕上げ	3800	2100	10	0.1	コアリング無

に起因する締固め性低下の緩和を目的に設定したものである。

打撃エネルギーの調整は、重錘の落下高さを変えることで行った。打撃エネルギー $E_{imp}$ を示す式(3)<sup>11)</sup>より、必要な落下高さを計算する式(4)を導き、打撃エネルギー、層厚に応じて、落下高さを計算した。材料の締固め層厚 $h$ は締固めの進行に伴い変化するが、ここでは、落下高さが最大となる仕上がり時の層厚を入力した。仕上がりの層厚が10cmの場合、0.1~0.4Ecの打撃エネルギーを与えるために必要な落下高さは10~40cmである。

$$E_{imp} = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{0.0551V} = \frac{m_f \cdot H}{5.625V} \quad (3)$$

$$H = \frac{5.625 \times 3800h}{2100} E_{imp} \approx 10h \cdot E_{imp} \quad (4)$$

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>)
- $h$  : 締固め層厚 (cm)

また、S3, S4層については、同一の層厚および締固めエネルギーを設定しているが、S4層については締固めの前に脱気処理を実施している。脱気処理は、重錘を落下させる前に、投入した材料に対して重錘の自重を作用させて軽く締固めを行い、材料中に含まれる空気を排出させる工程である。

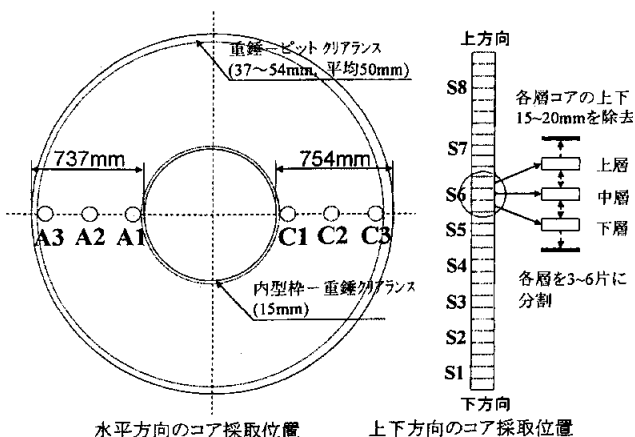


図-9 コアサンプリング位置

#### d) 試験手順

試験手順を下記に整理する。表-3の条件に従い、下層より順に締固めを行った。締固めは、ピット内に投入した材料を重錘の回転により数均し、試験ケースに応じて重錘自重による脱気処理を行った後、重錘を20°単位で回転させながら全断面に対して万遍なく締固めを行った。締固めは、各層毎に密度の増加がほぼ見られなくなるまで繰り返して行った（本試験では、1回の重錘落下による層厚の変形量1mm以下を管理値として設定した）。複数の打撃エネルギーを設定した層については、小さい打撃エネルギーから順に、各打撃エネルギー毎に密度の増加が見られなくなるまで締固めた後、順次打撃エネルギーを増加させて締固めを行った。締固めが終了した後、各層毎に層厚の測定を行い、投入した材料の乾燥質量を層厚から求めた各層の体積で除すことで、層毎の乾燥密度を算定した。層厚の測定は、コンクリートピット上端に基準点を設定し、中心より8方向各3測点の合計24測点について、基準点から層表面までの距離を測量用スタッフにより測定し、平均値をその層の層厚とした。

また、施工された緩衝材の乾燥密度および含水比の空間的な分布の把握を目的に、S1~S3層, S4~S6層, S7, S8層の3回に分けて、図-9に示した水平方向6点について電動コアドリルによる直径100mmのコアサンプリングを実施した。採取したコアは、各層間の境界部数cmの領域を除き、各層を層厚に応じ3~6片に分割し、JIS A 1203に基づく含水比測定およびJIS A 1225(ノギス法)による密度測定を行った。なお、A1~A3側とC1~C3側で緩衝材部の幅が17mmほど異なるが、コンクリートピットの寸法精度および内型枠設置精度（中心のずれ）の問題によるものである。重錘-ピット間の平均50mmの隙間は、緩衝材の有効厚さと見なしていないことから、上記の設置精度の問題による寸法差は、緩衝材の機能に有意な影響を与えるものではない。

N1~N3層およびS1~S9層の締固めが終了した後に、内型枠の外枠収縮による緩衝材からの荷重解放を行い、クレーンにより内型枠を撤去し、内型枠の機械構造的な問題の有無を確認した。また、内型枠撤去後に、廃棄体挿入孔の自立性の確認および孔壁状態の観察、内空の寸法の測定を行い、廃棄体挿入孔の施工品質を確認した。

### 3. 試験結果

#### (1) 施工された緩衝材の乾燥密度

##### a) 各層毎の乾燥密度

各層毎に実規模原位置締固め試験の結果をまとめたものを表-4に示す。表中の層厚は、締固め後に測定した仕

表-4 実規模原位置締固め試験結果

層	打撃エネルギー (Ec) <sup>※1</sup>	総締固め回数 (回)	総締固めエネルギー (Ec)	材料投入量 [実績] (kg)	含水比 [測定値] (%)	仕上がり層厚 (cm)	平均乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
S1	0.2	20	4.0	701.4	14.4	9.82	1.646
S2	0.15	20	3.0	729.1	14.5	10.45	1.607
S3	0.3	16	4.8	715.8	14.6	10.70	1.540
S4	0.3	24	7.2	697.6	14.4	9.30	1.729
S5	0.4	16	6.4	708.9	14.2	9.94	1.647
S6	0.05 (20), 0.1 (20) 0.2 (20), 0.3 (20)	80	13.0	702.6	14.6	8.87	1.824
S7	0.1(32), 0.2(16)	48	6.4	1068.8	14.5	15.32	1.607
S8	0.1(24), 0.2(24)	48	7.2	1394.5	14.7	20.12	1.594
S9	0.1	32	3.2	705.6	14.8	10.47	1.548
全層 <sup>※2</sup>	—	348	65.5	9560.5	14.5	133.91	1.644

※1 ()内の数字は各打撃エネルギー毎の締固め回数 ※2 全層は捨層(N1~N3)を含む

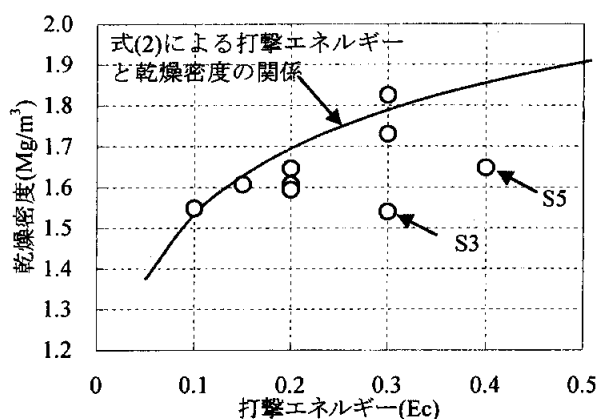


図-10 最大打撃エネルギーと乾燥密度の関係

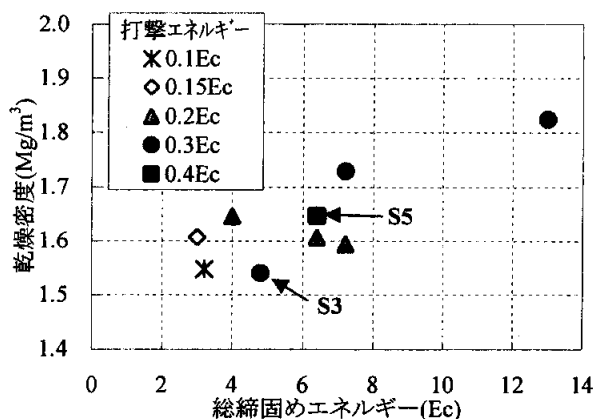


図-11 総締固めエネルギーと乾燥密度の関係

上がりの層厚であり、材料投入量はバッチ毎に測定した投入材料の実測質量である。含水比は各バッチ毎に35点の試料採取を行い測定した含水比の平均値を示している。乾燥密度は、層厚、材料投入量、含水比から計算した層平均の乾燥密度である。

各層の乾燥密度は1.540~1.824 Mg/m<sup>3</sup>の範囲となった。施工目標である乾燥密度1.6Mg/m<sup>3</sup>に対して、S3、S9層を除き、ほぼ目標を達成できている。

ここで、層別に得られた乾燥密度と打撃エネルギー、総締固めエネルギーの関係を図-10、図-11に整理した。図-10には、打撃エネルギーと得られる最大乾燥密度の関係の実験式である式(2)も記載したが、S3、S5層を除くと、今回の試験結果は、ほぼ式(2)の線上にプロットされており、既往の研究と整合した結果となっている。S3、S5層については、式(2)の線上より低乾燥密度側に外れているが、この原因については以下のように考えることができる。S3、S5層については、今回の試験条件の範囲では高い打撃エネルギーである0.3Ec、0.4Ecを設定しているが、他の層に比べ締固め回数が少なく、図-11を見ると与えた総締固めエネルギーは打撃エネルギー0.2Ec以下で締固めを行った層と同程度であり、早い段階で設

定した管理値に到達し、締固めを終了していることが分かる。一方、0.3Ec以上の高い打撃エネルギーを与えた層のうち、脱気処理を行ったS4層および段階的に打撃エネルギーを増加させたS6層では、高い乾燥密度が得られている。S4、S6層に共通するのは、材料中への空気の封入による締固め性の低下を避けるため、材料を投入した状態からの急激な密度上昇を避け、段階的に密度を上昇させている点であり、S3、S5層とS4、S6層の結果の差は、排気性の違いによるものと考えられる。大きな打撃エネルギーでの締固めにより、緩衝材表面付近の領域に急激な密度上昇が生じることで層上部に高密度層が形成され、下部に封入された空気の排出性が低下し、1打撃あたりの層厚の変化量が小さくなったものと推測される。大きな打撃エネルギーで締固めを行う場合には、事前の脱気処理の実施もしくは段階的な打撃エネルギーの増加など、材料からの排気性に留意した締固め方法の検討の必要性が示唆される。

次に、層厚の違いによる乾燥密度の差に着目すると、締固めエネルギーが同一で層厚の異なるS1層およびS7層、S8層の比較から、層厚の増加に伴い得られる乾燥密度は低下する傾向にあることが分かる。ただし、本検討での



層厚の範囲(10~20cm)で生じた乾燥密度の差は約0.05Mg/m<sup>3</sup>と大きくない。層厚を20cmとしたS8層の乾燥密度は1.594Mg/m<sup>3</sup>であり、わずかに1.6Mg/m<sup>3</sup>を下回ったものの、ほぼ目標と同程度の密度は得られており、層厚20cm以下の範囲であれば、層厚を増加させた場合でも必要な乾燥密度が確保可能であることを確認できた。

本試験により得られた各層の乾燥密度を見る限り、要求要件である1.6Mg/m<sup>3</sup>以上の乾燥密度の緩衝材の施工は十分に可能であるといえる。図-10より、排気性に問題があったと考えられるS3, S5層を除くと、1.6Mg/m<sup>3</sup>以上の乾燥密度を得るために必要な打撃エネルギーは0.15Ec以上となる。衝撃による岩盤・廃棄体損傷の問題等から打撃エネルギーの制限を受けない条件であれば、要求される乾燥密度を満足するという面において、本工法の適用性は確保されているといえる。

#### b) 乾燥密度および含水比の分布

本項では、内型枠方式原位置締固め工法による緩衝材の施工品質の確認を目的に実施したコアサンプリングによる緩衝材の各部位における乾燥密度、含水比の測定の結果並びに分布の傾向分析の結果を整理する。なお、本節における乾燥密度および含水比は、採取したコア毎の平均値を示す。

コアの乾燥密度測定結果について、各層毎に乾燥密度の平均、範囲を整理したものを表-5に示した。また、採取位置別の緩衝材の乾燥密度を図-12に、各層毎の上下方向並びに水平方向の採取位置毎の乾燥密度の度数分布を示したものを図-13, 14に示した。

表-5を見ると、コアの乾燥密度を平均した各層毎の平均乾燥密度の範囲は1.646~1.526Mg/m<sup>3</sup>となっており、特

に高密度に締固めた層において、前項で示した材料投入量から算定した層毎の平均乾燥密度に比べ小さい値となる傾向がみられる。この傾向の原因は明らかでないが、原因のひとつとして、高密度に締固めを行った緩衝材は除荷に伴い体積膨張が生じることが確認されており<sup>12)</sup>、コア採取により拘束が解かれたコアが膨張し、平均乾燥密度が低下したことが考えられる。各層毎の乾燥密度の範囲(最大と最小の差)は0.16~0.36Mg/m<sup>3</sup>であり、同一層内ではコア採取位置により1~2割程度の乾燥密度差が生じている。

次に、図-12においてコア採取位置と乾燥密度の関係に着目すると、全体的な傾向として、ピット側(外側)ではA3よりもC3の方が低密度であり、一方、内型枠側(内側)ではC1よりもA1の方が低密度となる傾向がある。原因としては、重錘に傾きがあった可能性があること、C3側のピットと重錘間のクリアランスが大きいこ

表-5 層別乾燥密度測定値の平均、範囲

層	平均	最大	最小	範囲
S1	1.633	1.744	1.529	0.21
S2	1.584	1.689	1.466	0.22
S3	1.573	1.648	1.444	0.20
S4	1.627	1.774	1.417	0.36
S5	1.642	1.722	1.542	0.18
S6	1.646	1.739	1.493	0.25
S7	1.526	1.695	1.366	0.33
S8	1.566	1.634	1.475	0.16

(単位: Mg/m<sup>3</sup>)

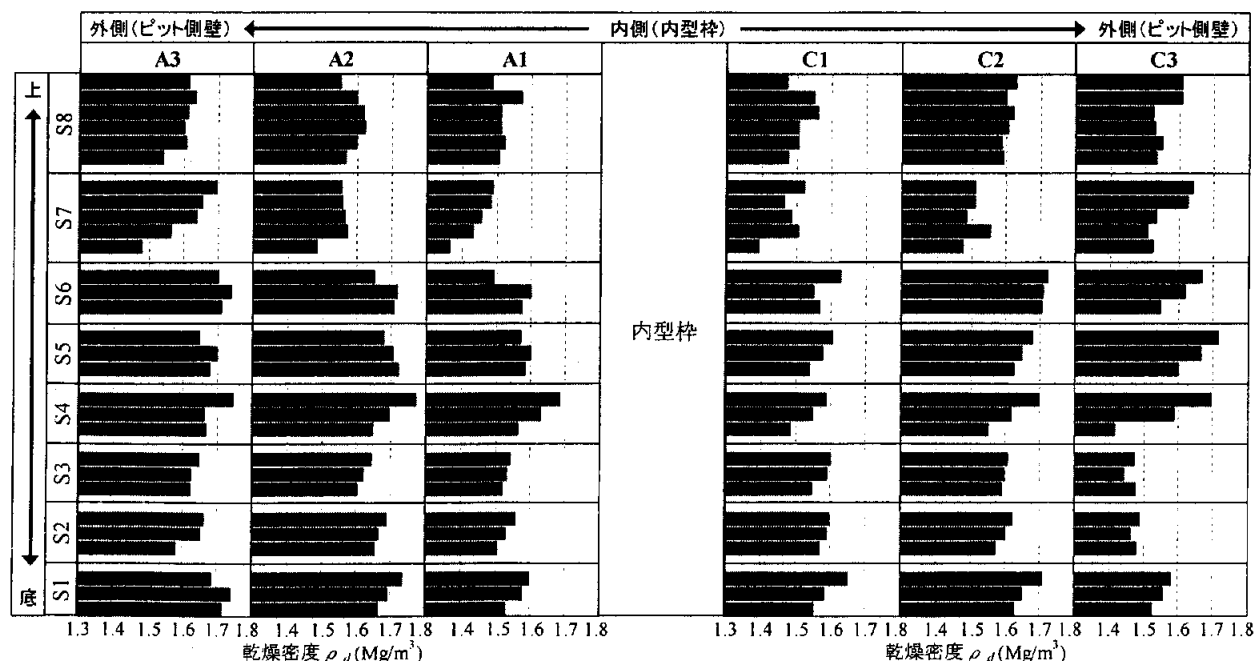


図-12 コアサンプリングによる緩衝材内の乾燥密度分布測定結果

と、材料投入時の敷均しが不十分で偏りがあった可能性があることが挙げられる。これらは作業の精度に起因する問題であり、装置の設置精度の向上や材料の十分な敷均しの実施により排除可能と考えられる。実際の施工システムの検討では、精度の高い位置・姿勢制御機構の検討および偏りが発生しない材料供給・敷均し機構の検討等により、緩衝材の施工品質の向上が期待できる。

図-13および図-14は、原位置締固め工法により施工さ

れた緩衝材の空間的な密度分布の定性的な傾向の把握を目的に整理した度数分布である。まず、図-13に示した上下方向の乾燥密度の度数分布を見ると、上層は高密度側に、下層は低密度側に多く分布していることが分かる。深い位置の密度が低くなる傾向は、一般の土質材料の動的な締固め<sup>13)</sup>と同様である。一方、図-14に示した水平位置別の乾燥密度の分布では、外側、中間に比べ内側の乾燥密度の分布が低密度側に偏っている。これは、内側

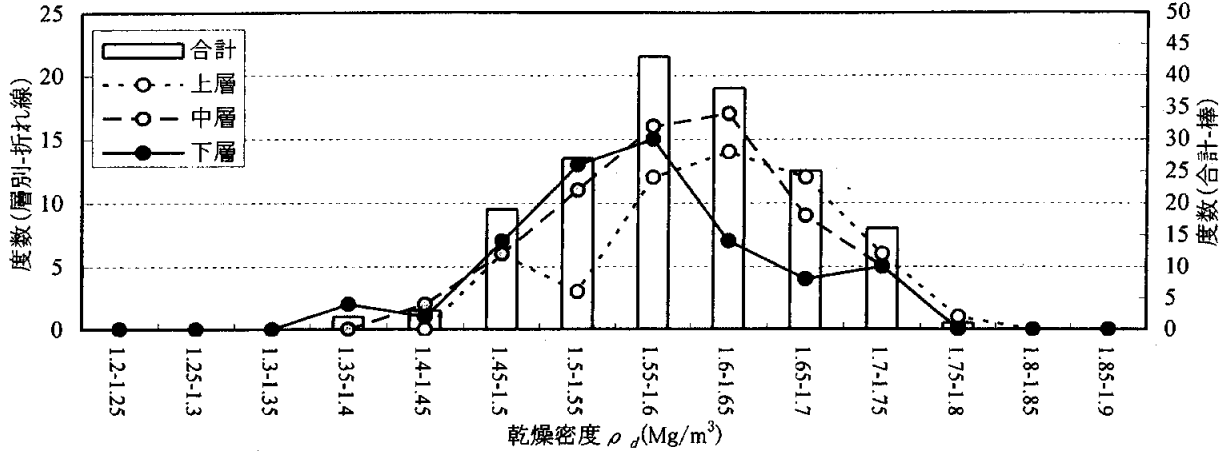


図-13 上下方向の乾燥密度度数分布

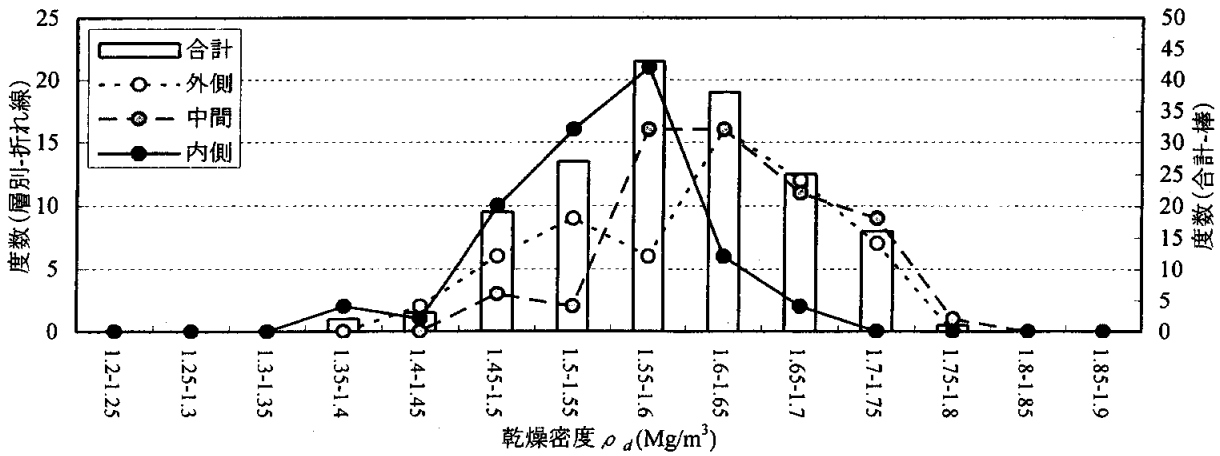


図-14 水平方向の乾燥密度度数分布

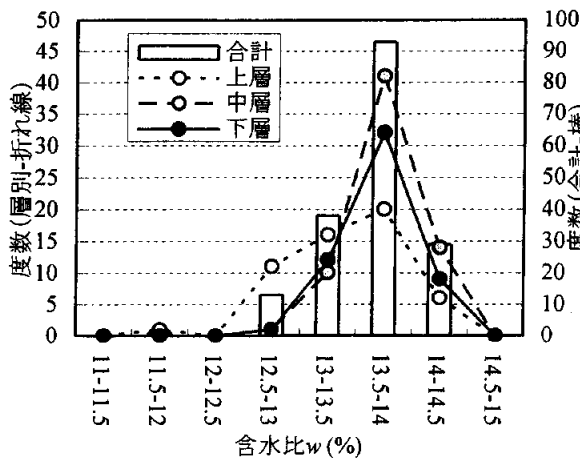


図-15 上下方向の含水比度数分布

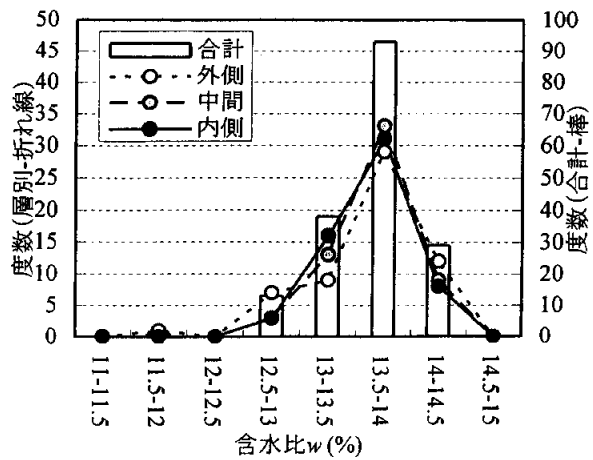


図-16 水平方向の含水比度数分布



図-17 内型枠の撤去作業

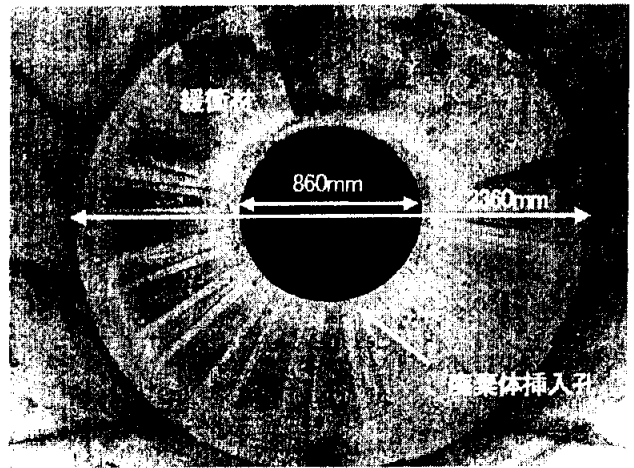


図-18 撤去後の緩衝材の状態

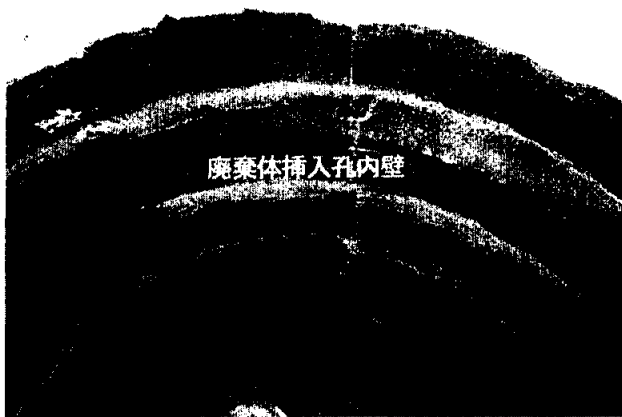


図-19 廃棄体挿入孔の内壁の状態

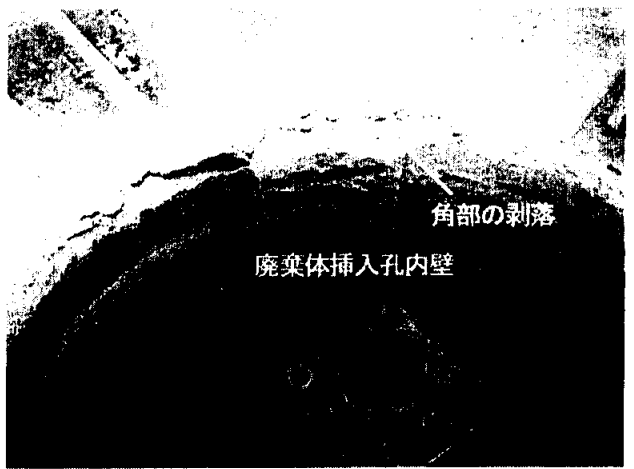


図-20 廃棄体挿入孔口部の状態

の方が重錘の幅が小さいため、締固め時に重錘および側壁（ピットもしくは内型枠）によって拘束される領域が狭く、隣接する拘束されていない緩衝材領域へのエネルギーの逸散が大きいためであると推測される。内型枠方式の原位置締固め工法では、内型枠周辺並びに締固め層の下層部の領域の乾燥密度が低くなる傾向があり、この領域が人工バリアとして弱部となりやすいといえる。

含水比の分布についても、同様に整理した。上下方向並びに水平方向の度数分布を図-15, 16に示した。平均値 $w=13.6\%$ 、最頻値 $w=13.5\sim 14\%$ となっており、締固め前に材料の含水比を測定した結果の平均値である $w=14.5\%$ に比べ、若干の含水比の低下が見られる。これは、締固めおよびコアサンプリング作業時に、外気に曝されることで乾燥したためであると考えられる。図-15に示した上下方向の含水比の度数分布を見ると、上層の乾燥密度が低い傾向が見られるが、締固め作業時の乾燥によるものと考えられる。図-16に示した水平方向の度数分布については、採取位置による傾向の差はほとんど見られない。以上の結果から、作業雰囲気の影響により材料の含水比が変化する可能性が示唆されており、施工作业時間、作業環境の温度・湿度条件によっては、締固め性への影

響も懸念される。緩衝材の施工における材料の含水比の調整・管理においては、作業雰囲気、作業時間を考慮した調整・管理を行う必要があるといえる。

## (2) 内型枠の動作および廃棄体挿入孔の品質確認

### a) 内型枠の機械構造的な問題の確認

内型枠解放・撤去の作業状況を図-17に示した。外枠の縮小による緩衝材からの荷重の解放および解放後の撤去作業はともに問題なく実施でき、また、回収した内型枠の状態を確認したところ、締固め時の衝撃による変形、損傷等は見られなかった。内型枠について、対策を要する機械構造的な問題は確認されなかった。

### b) 廃棄体挿入孔の自立性

図-18は内型枠撤去後の緩衝材の状態である。施工された緩衝材の高さは1.33mであるが、内型枠撤去後も廃棄体挿入孔の内壁は自立し、目立った剥落や凹凸は見られなかった。図-19は廃棄体挿入孔の内壁の状態である。内壁に層状の色の濃淡が見られるのは、内型枠に塗布した錆止め材が付着した箇所の色が変化しているためである。わずかに内型枠に付着して剥離した形跡が見られる。図-20は廃棄体挿入孔の孔口部の状態を示しているが、

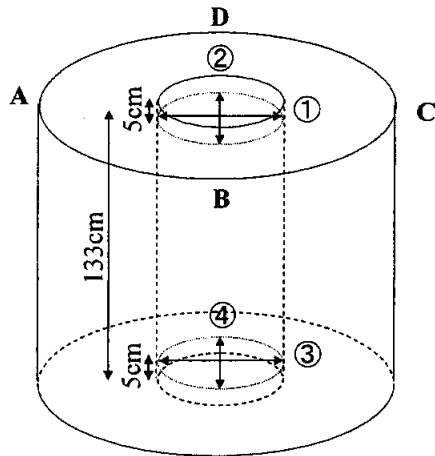


図-21 廃棄体挿入孔寸法測定箇所

角部の締固めが不十分であり、やや剥落が見られる。全体として、廃棄体挿入孔内壁および角部に若干の剥離・剥落が見られるものの、これらは目視で確認する限り、廃棄体挿入時に障害となるような顕著なものではなく、問題の無い施工品質が得られていると考えられる。

#### c) 廃棄体挿入孔の内空寸法

廃棄体挿入孔は内型枠により所定の寸法の内空が与えられるが、締固めに伴い内型枠には高い圧力が作用することから、内型枠に変形が生じ廃棄体挿入孔が仕様どおりの寸法とならない可能性がある。また、高密度に圧縮されたベントナイトは、拘束解放時、さらに時間経過に伴い体積膨張が生じることが知られている<sup>12)</sup>。内型枠撤去後に、上記の体積膨張により内空に変形が生じる恐れがある。本項では、内型枠撤去直後の廃棄体挿入孔の寸法および経時的な寸法変化量の測定を行った結果を整理する。

測定箇所は、比較的乾燥密度が高く、また、上部の緩衝材により上下方向の変形が制限される挿入孔下部と、乾燥密度が低く、変形に対する拘束を受けにくい挿入孔上部を測定の対象とし、図-21に示したように、それぞれ直交する2方向について測定を行った。

寸法の測定は、内型枠撤去直後並びに撤去より7日経過後に行うものとした。実際の操業では廃棄体挿入孔構築後、速やかに廃棄体定置を実施するものとしており、何らかのトラブルで作業が停滞した場合でも数日中には廃棄体の定置が行われると考えられる。廃棄体挿入孔の経時的な寸法変化が廃棄体の定置作業に及ぼす影響を評価するにあたり、7日という経過時間は十分に保守的な条件であるといえる。

測定結果を表-6に示す。廃棄体挿入孔の内径の設計値は860mmを設定しているが、撤去直後については内径856~863mmとなっており、設計値に対して-4mm~+3mmの差が見られた。内型枠の荷重解放に伴う挿入孔内壁の顕著な膨張は目視では確認できなかった。内型枠撤去から7日経過後では、挿入孔上部の寸法の変化は見

表-6 廃棄体挿入孔寸法の測定結果

No.	測定位置	測定寸法(mm)		7日後増減(mm)	設計値との差(mm)
		撤去直後	7日経過後		
①	AC上部	861	861	±0	+1
②	BD上部	858	858	±0	-2
③	AC下部	863	860	-3	±0
④	BD下部	856	849	-7	-11

られないが、下部は3~7mmの内径の縮小が生じた。下部の測定位置の方が緩衝材の乾燥密度が高いことおよび上部に比べ上下方向の変形に対して拘束力が大きいことから、材料内に圧縮された封入空気による膨張および粒子骨格の弾性変形の回復が内壁側に生じたものと考えられる。今回測定を行った箇所において、設計値に対して最も大きな差が生じたのは測定位置BD下部であり、その差は11mmであった。定置システムの設計上は、廃棄体と挿入孔内壁のクリアランスを20mmに設定しており、今回の試験結果では平均5mm強、設計値に対して30%弱のクリアランスの縮小が生じる結果となった。実際の緩衝材の施工では、廃棄体側部緩衝材の高さは1.86mであり、今回の試験で施工した高さよりも約50cm高く、最下部ではさらに大きな内径収縮が生じる可能性がある。今回の試験では、一部の条件が実施工と異なることから、廃棄体挿入孔の内径収縮が無視できるものでないことを確認するに留まるが、今後、実際の緩衝材施工で想定される寸法収縮を定量的に把握するとともに、内型枠の荷重解放に伴う内径縮小に留意した廃棄体の定置機構および定置精度の検討並びにクリアランスの設定を行う必要があると考えられる。なお、廃棄体挿入孔の内径収縮の問題を人工バリア性能の面からみた場合、定置後の廃棄体と緩衝材の隙間は、膨潤したベントナイトに充填される領域であることから、問題にはならない。

#### 4. 結論

内型枠方式の原位置締固め工法を模擬した実規模締固め試験を実施し、実証的なアプローチで本工法の緩衝材施工への適用性の検討を行った。主な成果を下記に示す。

- ・実施工を模擬した締固め試験装置により、最大1.82Mg/m<sup>3</sup>の乾燥密度の緩衝材を施工することができた。ケイ砂混合率30%のベントナイト・ケイ砂混合材料に対して、0.15Ec以上の打撃エネルギーを与えることで、要求される平均1.6Mg/m<sup>3</sup>以上の乾燥密度の緩衝材の締固めが可能であることを確認した。
- ・大きな打撃エネルギーで締固めを行う場合、急激な密度上昇に伴う排気性の低下により締固め性が低下する

可能性があることを確認した。締固めにおいて段階的に打撃エネルギーを増加させるなど、排気性に留意した締固め方法の検討が必要である。

- ・コアサンプリングにより、施工された緩衝材の乾燥密度、含水比の空間的な分布を測定した。サンプリングしたコアの乾燥密度の範囲は $1.37\sim 1.77\text{Mg/m}^3$ であり、締固め層の内型枠側および層下部の領域の乾燥密度が低くなる傾向が見られた。
- ・内型枠により構築された廃棄体挿入孔について、廃棄体の定置に対して障害となるような孔壁の剥離・損傷は見られなかった。ただし、時間経過とともに廃棄体挿入孔下部に内径の収縮が生じ、廃棄体と挿入孔内壁間のクリアランスについて設計値に対し30%弱(5mm強)の収縮が確認された。経時的な寸法変化を考慮した施工システムの構築が必要であると考えられる。
- ・機械構造的な問題として、内型枠荷重解放機構の動作および衝撃による変形・損傷について確認を行ったが、いずれも問題は見られなかった。一連の施工作业においても障害となる可能性のある機械構造的な問題は確認されなかったが、内型枠の設置精度の問題による中心のずれ、重錘の傾き等に起因すると考えられる乾燥密度の偏りが確認された。高い精度を有した位置・姿勢制御機構等の検討により、緩衝材の施工品質の向上が図れるものと考えられる。
- ・今回実施した実際の施工システムを模擬した試験装置による締固め試験の結果、施工された緩衝材の品質および締固め装置の機械構造について、いずれも対策を要する問題は見られなかった。これにより、内型枠方式の原位置締固め工法の緩衝材施工に対する適用性を確認することができた。

我が国において、これまで緩衝材施工技術を実証的なアプローチで研究した例は少なく、実際のスケールにおいても要求する仕様の緩衝材の施工が可能であることの見通しを得られたことは、我が国のHLW処分の技術的信頼性を向上させる知見の一つとして有意な成果であるといえる。締固め時の衝撃による岩盤・廃棄体損傷や処分孔内の湧水対策等の問題等が残されるが、良好な岩盤強度を有し、湧水量が少ない、条件の良い岩盤においては、原位置締固め工法による緩衝材の施工は十分に可能であると考えられる。

なお、本報告は経済産業省「地層処分技術調査等/遠隔操作技術高度化調査」の研究成果の一部を取り纏めた

ものである。

#### 参考文献

- 1) 増田良一, 朝野英一, 雨宮清, 千々松正和, 小峯秀雄, 足立格一郎: 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, 土木学会論文集, No.764/III-67, pp.329~340, 2004.
- 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, 4.1.2.1 緩衝材の性質, pp.IV-69~IV-142, 2000.
- 3) 西村毅, 小野文彦, 増田良一: 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-194, 2000.
- 4) 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.
- 5) 小野文彦, 出口朗, 雨宮清, 小林正明, Oanh .T. D. P.: 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.
- 6) 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, 第4章 遠隔操作技術の品質・安全に関する検討, pp.4-1~4-145, 2003.
- 7) 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.
- 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, 4.1.2.2 緩衝材の設計, pp.IV-143~IV-156, 2000.
- 9) 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.
- 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, 3.2.2 品質管理項目及び考え方の検討, pp.3-128~3-150, 2002.
- 11) 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.
- 12) 増田良一, 高尾肇, 千々松正和, 雨宮清, 竹ヶ原竜大, 小峯秀雄: ベントナイトブロックの製作・施工性に対する初期含水比の影響に関する検討, 第55回土木学会年次講演会, CS10-043, 2002.
- 13) 地盤工学会: 土の締固めと管理 地盤工学会編, 2.2.3 各種締固め機械の締固めメカニズム, pp.39~58, 1999.

(2003.11.7 受付)

## STUDY ON IN-SITU COMPACTION METHOD FOR BENTONITE BUFFER BY MEANS OF FULL-SCALE COMPACTION TEST

Ryoichi MASUDA, Hidekazu ASANO, Kiyoshi AMEMIYA, Yoshiji MORO,  
Kazuhiro KOSUGE and Hideo KOMINE

An in-situ compaction with inner mold system is one of the methods of buffer construction technology. The method is examined in this study by carrying out compaction tests, and validated with real-size disposal pit made of concrete and semi-automatic compaction machine designed for work with remote controlled system. In this study, basic performance of in-situ compaction machine with inner mold was confirmed as mechanically feasibility, and it was also confirmed that compaction buffer has an appropriate dry density of more than  $1.6\text{Mg/m}^3$  toward a required specification of engineered barrier system. Finally, it is concluded that the technology is prospective for actual construction of buffer material.