

吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験

1995年5月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1995

吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験

杉田 裕 藤田朝雄 菅野 紂

要 旨

地層処分における高レベル放射性廃棄物の定置方式については、豎置方式、横置方式の代表的な2案に関して検討がなされている。処分システムの設計研究のなかで、緩衝材の施工技術開発は、人工バリアシステムの機能を担保するうえで重要な項目の一つである。

豎置方式の緩衝材の施工については、これまでに動力炉・核燃料開発事業団の緩衝材大型試験設備（Big-Ben）においてブロック方式および現地締固め方式の試験施工が実施され、処分孔内の緩衝材の施工方法と密度の関係に関するデータが得られている。

一方、横置方式については、緩衝材の施工方法の一つとして吹付工法が考えられているが、国内におけるその施工実績の例はない。

このため、既存の吹付機を用いた緩衝材の吹付試験を実施し、吹付作業の可能性、施工性および品質・性能に関する知見を得た。

試験の結果、最適含水比付近の試料では緩衝材の吹付が可能であることが確認できた。吹付により得られた緩衝材の乾燥密度は $1.0\sim1.5\text{g/cm}^3$ であり、さらに電動タンピングランマーによる吹付試料の締固めを行うことで $1.5\sim1.7\text{ g/cm}^3$ の乾燥密度を得ることが出来た。

吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	3
2.1 試験試料	3
2.2 吹付方法	5
2.3 サンプリング試験	7
3. 試験結果および考察	9
3.1 締固め試験	9
3.2 予備吹付試験	10
3.3 吹付試験	12
3.4 吹付転圧試験	15
4. まとめと今後の課題	17
4.1 まとめ	17
4.2 今後の課題	17
参考文献	19
謝辞	19

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物（以下「廃棄物」という。）の処分としては、地層に処分する方法がもっとも確実な方法として考えられている。廃棄物の地層処分においては多重防護の思想に準拠して安全確保の仕組みとして多重バリアシステムが検討されている。多重バリアシステムは、人工的に設けられる多層の安全防護系（人工バリア）と、種々の安全防護機能を本来的に備えている地層（天然バリア）との多重の組合せによって構成されている。廃棄物は、ガラス質に溶融され金属容器に封入されて固化された状態（ガラス固化体）で貯蔵される。処分に当たっては、このガラス固化体をさらにオーバーパックとよばれる容器に封入して埋設し、まわりの地層との空間には粘土質の充填物（緩衝材）をつめておくことが、最も有効と考えられている埋設方法である。この地層処分の研究開発において、動力炉・核燃料開発事業団（以下「動燃」という。）は、これまで地層処分技術の確立を目指して、研究対象を明確に規定し得る人工バリアに重点をおいて検討を行ってきた¹⁾。

人工バリアの定置方式としては、豎置方式、横置方式の代表的な2案について検討がなされている。処分システムの設計研究のなかで、緩衝材の施工技術開発は、人工バリアシステムの機能を担保するうえで重要項目の一つである。室内試験では緩衝材の締固め試験等により埋め戻し材料としての最適含水比と密度の関係が取得されている²⁾。

工学規模の試験では、豎置方式については、これまでに動燃の緩衝材大型試験設備（Big-Ben）においてブロック方式および現地締固め方式の施工試験が実施され、緩衝材の乾燥密度に関するデータが得られている³⁾⁴⁾。

一方、横置方式については、吹付工法が緩衝材の施工方法の一つとして考えられているが、国内におけるその施工実績の例はなく、基礎試験に関するデータも取得されていない。

このため、吹付作業の可能性、施工性および品質・性能に関する知見を得るために、既存の吹付機を用いた緩衝材の吹付試験を実施することとした。

本報告は、（横置方式の）緩衝材施工及び（豎置方式の）坑道閉鎖技術開発の一環と

して、混合ペントナイトの吹付工法による固着試験を実施し、吹付材料と密度および含水比との関係を測定し、これらの関係についてとりまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 試験試料

本研究で用いた試料は、ベントナイト（クニゲルV1）、珪砂2種類（3号珪砂、5号珪砂）および川砂の4種類である。使用した試料の一覧を表-2.1に示す。試験に際して、2種類の珪砂を重量比1:1であらかじめ混合し、コンクリートミキサーによりベントナイトと混合した珪砂を重量比7:3で練り混ぜた。

珪砂の自然含水比は0.5%、ベントナイトの自然含水比は5.9%であった。試料の練り混ぜ時の添加水量は、締固め試験（N=50, JIS A 1210に準拠）によって得られた最適含水比（図-2.1）を基準として $W/(B+S)=16.5, 18.5, 20.5, 24.5\%$ の4水準となるように調整した。

また、比較試験のため、珪砂の代わりに川砂を混合した試料も準備した。添加水量は、含水比 $W/(B+S)=20.5\%$ となるように調整した。

珪砂および川砂の粒度分布を図-2.2に、試験試料の配合を表-2.2に示す。

表-2.1 使用材料一覧

材料	産地等	販売元
ベントナイト	山形県月布産Na-ベントナイト	クニミネ工業（株）
珪砂	愛知県瀬戸市産3号珪砂 西豪州産5号珪砂	日陶連原料（株）
川砂	静岡県大井川産川砂	海運建材（株）

表-2.2 試験試料の配合一覧

混合率 (B/S)	水量 $W/(B+S) [\%]$	混合砂の種類
70/30	16.5	珪砂
70/30	18.5	珪砂
70/30	20.5	珪砂
70/30	24.5	珪砂
70/30	20.5	川砂

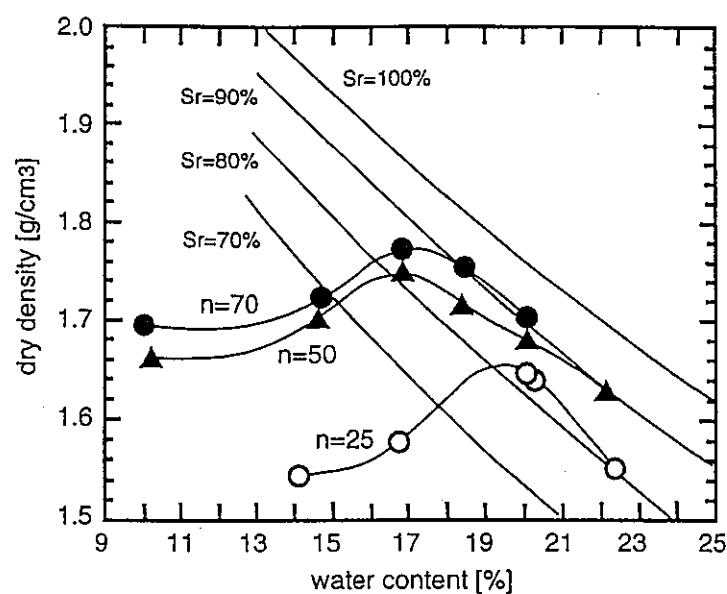


図-2.1 乾燥密度と最適含水比の関係

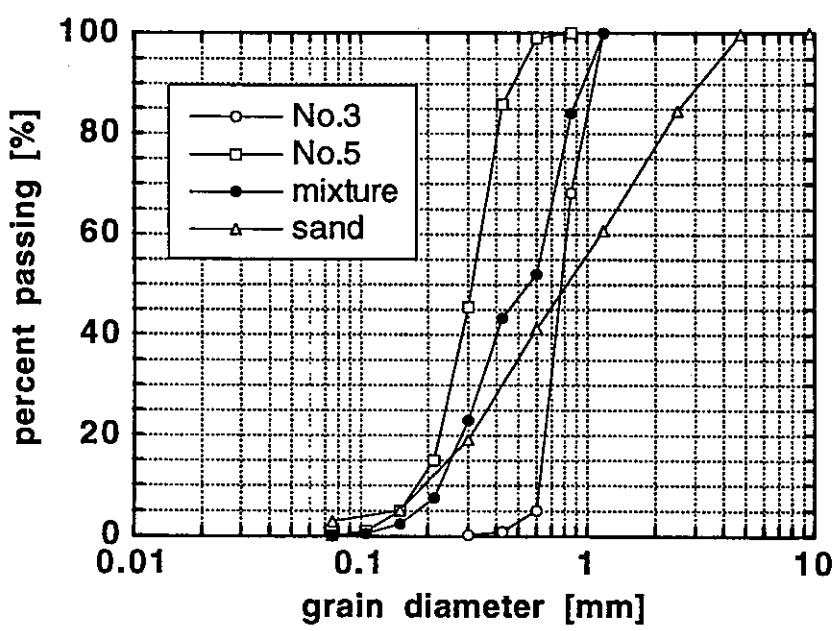


図-2.2 珪砂および川砂の粒度分布

2.2 吹付方法

吹付試験は、コンクリート吹付機を用いて、岩盤を模擬するためにモルタルを表面に付着させた板（写真-2.1参照）を鉛直に設置し、水平横方向に吹き付けた。使用機器の一覧を表-2.3に示す。使用した吹付機は、アリバ社製のコンクリート吹付機（写真-2.2参照）で、吹付能力は毎時 12m^3 である。使用空気圧は $0.5\sim6\text{kgf/cm}^2$ であり、ホース径は 65mm である。

吹付け機の圧送ホースの先端部は、吹付作業中、空気圧により先端がぶれないようするため、図-2.3、写真-2.3に示すように小型油圧バックホーのバケット部に固定した。

表-2.3 使用機器一覧

使用機器	仕様
コンクリート吹付機	アリバ社製AL-280 全高：1.4m、全幅：0.85m 全長：2.25m 吹付け能力： $12\text{m}^3/\text{H}$ 使用空気圧： $0.5\sim6\text{kgf/cm}^2$ ホース径：65mm
コンプレッサー	DPS750 170PS、 $18\text{m}^3/\text{min.}$
小型油圧バックホー	0.03m^3 、ゴムクローラ式

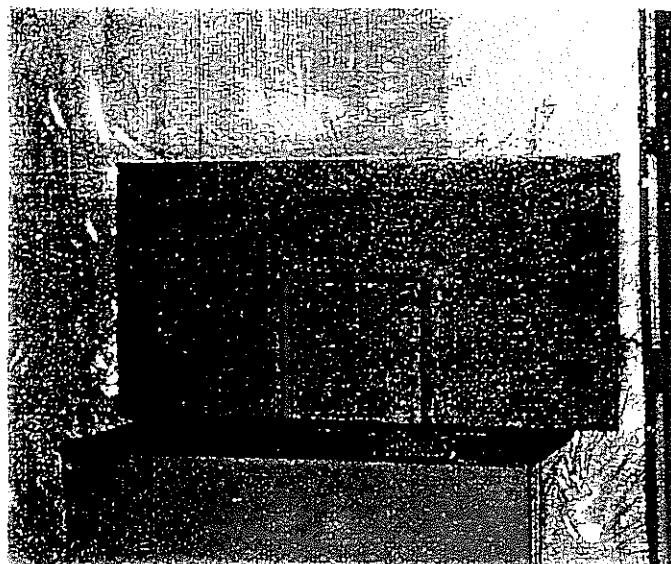


写真-2.1 模擬岩盤

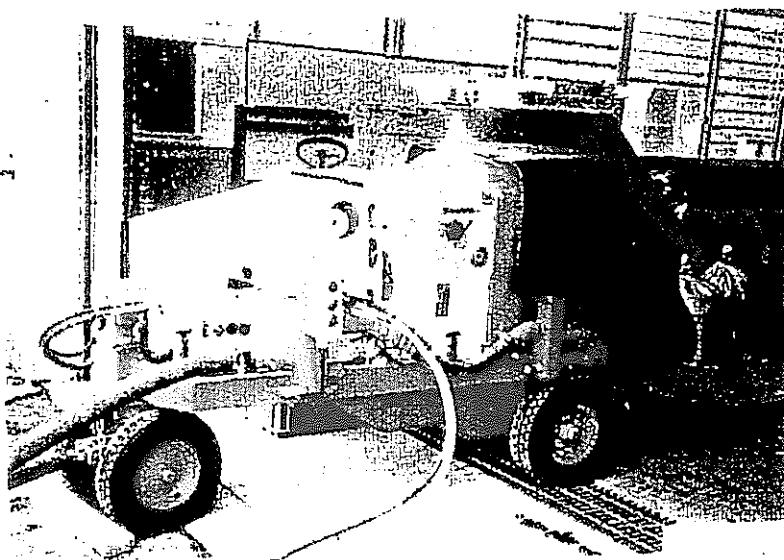


写真-2.2 コンクリート吹付機

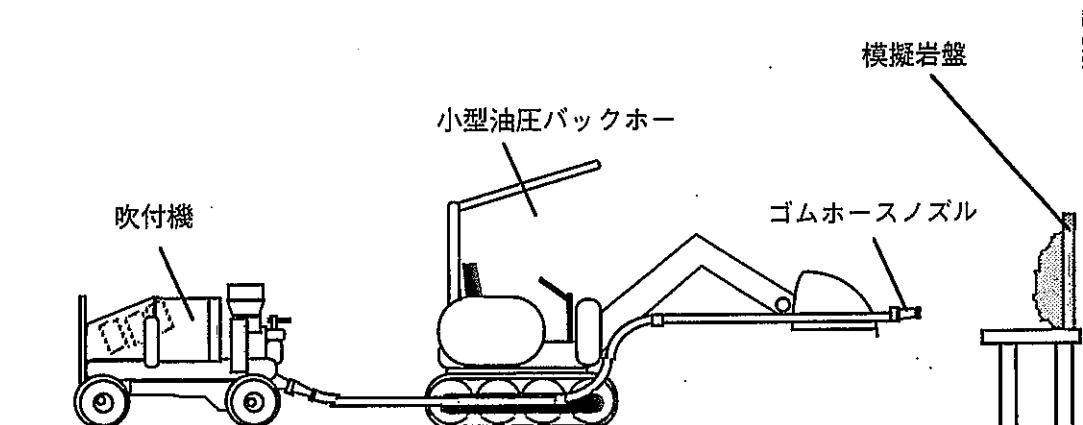


図-2.3 吹付作業状況

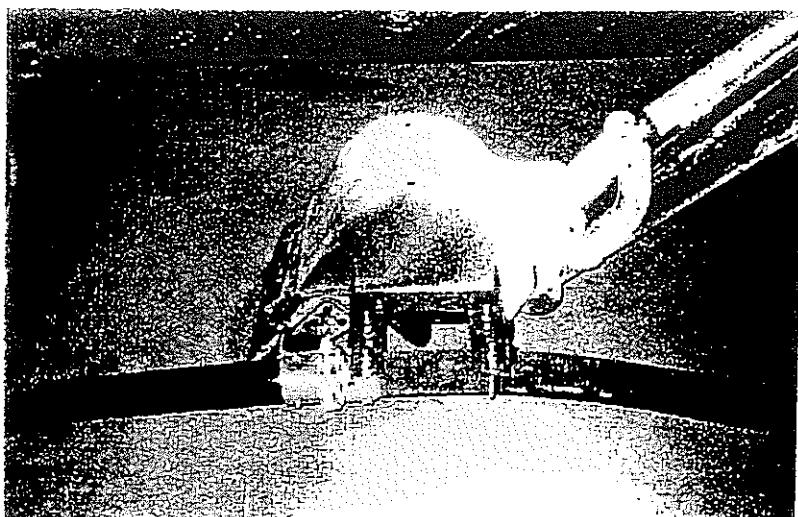


写真-2.3 圧送ホース固定部

吹付距離は1.4m、吹付圧は2kgf/cm²とした。吹付作業時は、吹付厚さが均等になるようホース先端のゴムホースノズルを上下左右に操るようにした。

2.3 サンプリング試験

吹付けた試料は、緩衝材の密度および含水比を測定するため、サンプル試料を採取した。サンプリングには写真-2.4に示すシンウォールサンプラー（直径7.5cm、長さ5cm）を用い、吹付けた緩衝材に貫入させ、試料を採取した。緩衝材を対象としたサンプリング試験は、以下の3種類である。

- 1) 密度および含水量の測定。
- 2) 締固め試験。
- 3) 吹付転圧試験。

密度および含水量の測定は、土の単位体積重量試験および土の含水量測定試験（JIS A 1203）に準拠した。採取試料は、含水量が変化しないように、採取後速やかに重量の測定を行った。重量測定後、採取位置を記録するとともに採取試料を採取皿に写し、110℃の乾燥炉中で2時間乾燥し、その乾燥重量を測定した。

締固め試験は、緩衝材中の水分量が締固め時の密度に及ぼす影響を把握するため実施した。試験は、締固め試験（JIS A 1210、第一方法）に準拠し、2.5kgランマーを用いて各層当たり突固め回数N=50（E=2Ec）、3層の突固めとした。

吹付転圧試験は、緩衝材を吹付けた後に締固めた場合の密度を把握するため、写真-2.5に示すような電動タンピングランマー（総重量45kg、打撃数650～750回/分、打撃力750～850kg/回）を用いて転圧した。今回用いた電動タンピングランマーは、その機構上、水平横方向の転圧が困難であるため、吹付けた緩衝材をブロック状の試料として模擬岩盤からはぎ取り、これをコンクリートの床面上で転圧した。

緩衝材の転圧は、高さ10～20cm/層で試料を置き、15秒/層の締固めを3層実施した。緩衝材の転圧後、2箇所のサンプリングを行い、密度および含水量の測定を行った。

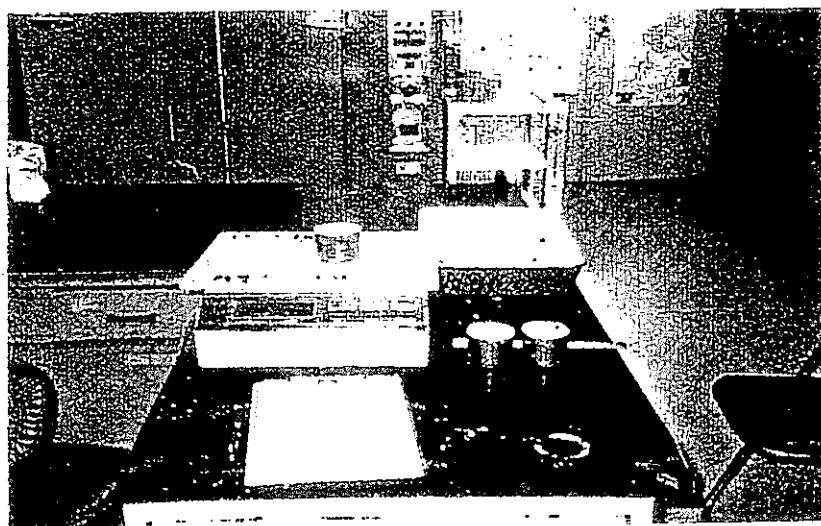


写真-2.4 シンウォールサンプラー

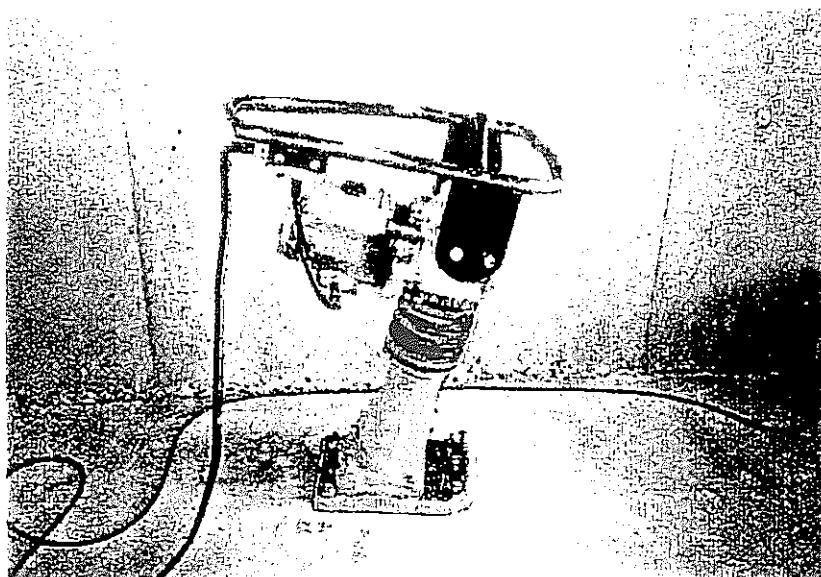


写真-2.5 電動タンピングランマー

3. 試験結果および考察

今回用いた試料においては、事前に実施した試料の練り混ぜ状況から、水分量の増加とともに塊状粒子が大きくなり、しかも、その量も多くなる傾向が認められた。

その塊の大きさは、含水比 $W=16.5\%, 20.5\%, 24.5\%$ のそれぞれにおいて直径2~3mm程度、直径5mm程度、直径10mm程度であり、 $W=24.5\%$ の配合の場合、塊状粒子の生成量が急激に増加した。塊状粒子の生成は、試料の含水比の不均一差を意味し、本試験では $W=24.5\%$ が添加水量の上限と考えられる。

3.1 締固め試験

本試験は、試料の最適含水率を求めるために実施した。試験の結果を表-3.1に、乾燥密度と含水比の関係を図-3.1に示す。使用した試料はベントナイトに珪砂を30%含有したものである。初期含水比は $W=16.5, 18.5, 20.5, 24.5\%$ の4種類を用いた。これま

表-3.1 締固め試験結果一覧

試料 B/S=70/30	含水比 [%]	湿潤密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]	間隙比	飽和度 [%]
N,W=16.5%	16.2	1.988	1.711	0.50	83
N,W=18.5%	17.2	1.971	1.681	0.53	84
N,W=20.5%	19.3	1.990	1.668	0.54	92
N,W=24.5%	22.1	1.962	1.606	0.60	95

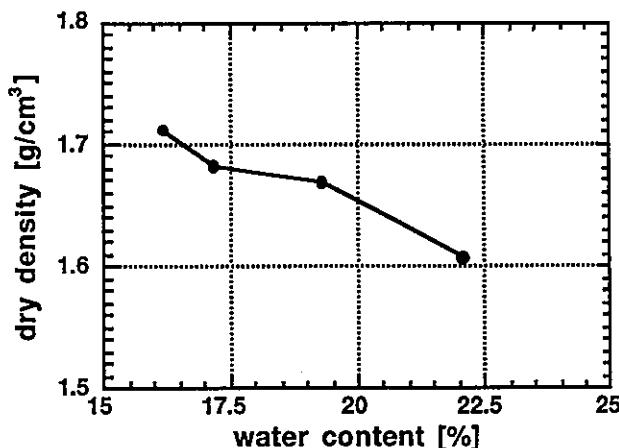


図-3.1 締固め試験結果

での研究より求められた緩衝材の締固め曲線によれば最適含水率はW=16.5%であるが、図から試料の乾燥密度は含水比の増加とともに減少する傾向を示した。

3.2 予備吹付試験

本試験は、配合の違いによる圧送性、施工性および付着性を把握するため、予備的に実施した試験である。予備試験であったため、吹付量は50リットル程度と少量にとどめた。

試料は含水比W=16.5～24.5%の全ての場合において実施し、いずれの配合においても、ホース内が閉塞することなく、コンクリート吹付機を用いて模擬岩盤に吹付けが可能であることを確認した。

また、吹き付けられた緩衝材内部は、剥離、崩壊等の現象がなく比較的健全な状態で模擬岩盤に付着することが分かった。ただし、初期の段階で緩衝材の付着を促すため、模擬岩盤を湿らすことが必要であった。

写真-3.1に示すように、模擬岩盤表面を湿らさない場合の吹付では、吹付時には緩衝材が壁面に固着したものの、その後のサンプリング時の衝撃等により緩衝材が崩壊した。

一般に吹付作業時に問題となる粉塵の発生に関しては、

- ・含水比W=16.5%以下の場合、緩衝材の跳ね返りが見られ、粉塵もかなり発生した。
- ・含水比W=18.5%以上で跳ね返りおよび粉塵はほとんど発生しなかった。

ことから、今回の試験に関しては含水比W=16.5%が吹付作業性及び作業環境の観点から下限値と判断された。

予備試験結果の一覧を表-3.2に、緩衝材の乾燥密度と含水比の関係を図-3.2に示す。ここでは、サンプリングを各々1箇所とした。また、予備試験では珪砂の代わりに川砂を混合した材料に関して含水比W=20.5%のものも実施した。

含水比がW=16～20%の間では緩衝材の乾燥密度はあまり水量の影響を受けなかった。いずれの場合においても、吹付作業のみでは 1.5g/cm^3 以下の乾燥密度であった。

表-3.2 締固め試験結果一覧

試料 B/S=70/30	含水比 [%]	湿潤密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]	間隙比	飽和度 [%]
N,W=16.5%	17.7	1.504	1.278	1.01	45
N,W=18.5%	16.4	1.137	0.977	1.63	26
N,W=20.5%	20.6	1.396	1.157	1.22	43
N,W=24.5%	22.7	1.829	1.490	0.72	81
川砂	22.0	1.694	1.388	0.87	66
W=20.5%	22.3	1.662	1.359	0.91	64
	22.1	1.665	1.364	0.90	64
	22.1	1.653	1.354	0.91	63

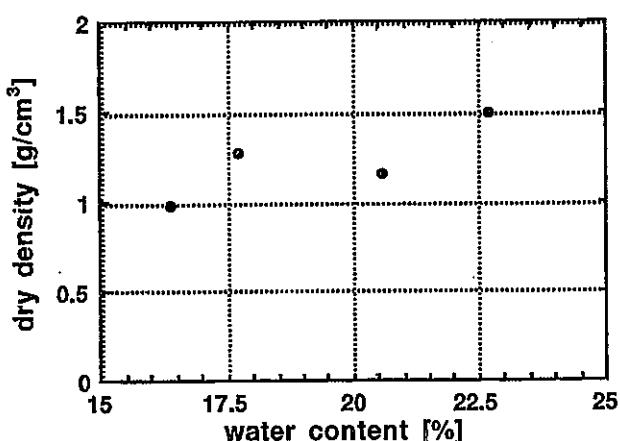


図-3.2 緩衝材の含水比と乾燥密度の関係

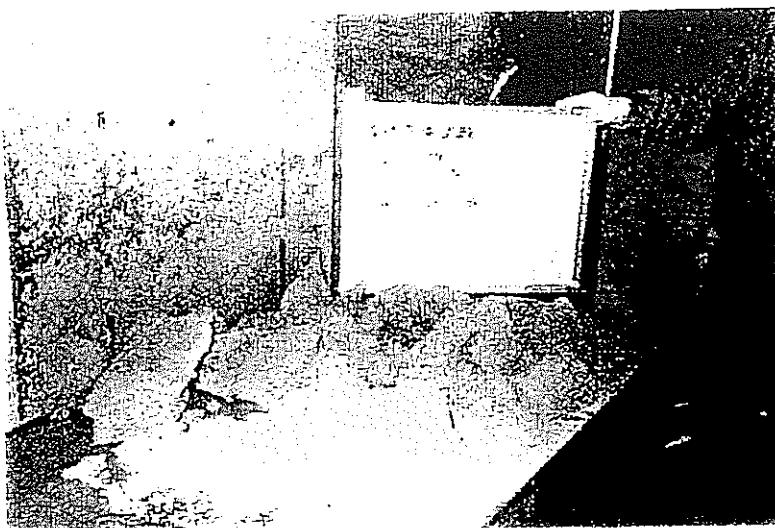


写真-3.1 崩壊した緩衝材

3.3 吹付試験

本試験は、これまでの試料の準備、締固め試験、予備試験の結果から表-3.3に示す試験条件で吹付試験を行った。

吹付試験後のサンプリングによる測定結果の一覧を表-3.4に示す。サンプリング試料はそれぞれの吹付試料から3個ずつ採取した。サンプリングの位置を図-3.3に示す。

表-3.3 吹付試験条件一覧

試料名	含水比 [%]	吹付量 [リットル]	吹付厚さ [cm]
16T10	16.5	100	10
20T10	20.5	100	10
16T14	16.5	100	14
16T60	16.5	300	60

表-3.4 吹付機による緩衝材締固め試験結果一覧

試料	含水比 (%)	目標吹付厚 (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)	飽和度	
				(%)	(%)
16T10	吹付	16.1	—	1.305	43
		16.6	10	1.323	45
		16.9	—	1.367	49
	転圧	16.6	—	1.749	91
		16.3	—	1.710	83
20T10	吹付	22.2	—	1.074	41
		22.1	14	1.101	43
		22.2	—	1.086	42
	転圧	22.6	—	1.532	86
		22.5	—	1.473	78
16T14	吹付	16.8	—	1.124	34
		17.4	10	1.043	31
		16.6	—	1.034	29
	転圧	15.9	—	1.725	84
		16.0	—	1.727	84
16T60	吹付	16.9	—	1.246	41
		18.2	60	1.276	46
		17.1	—	1.205	39

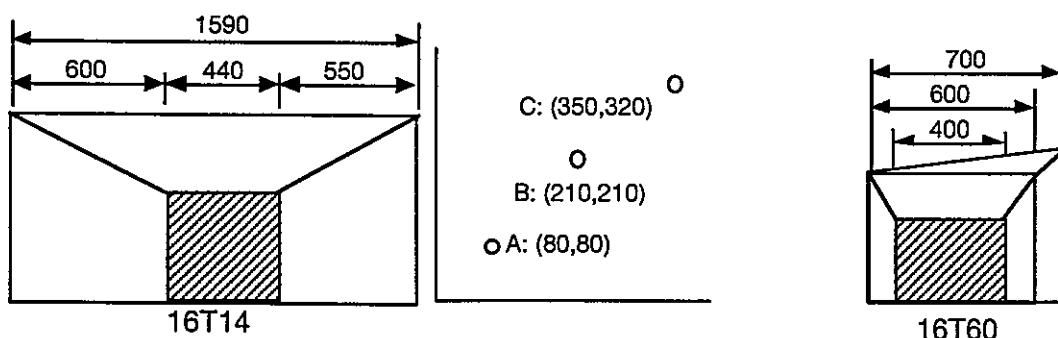
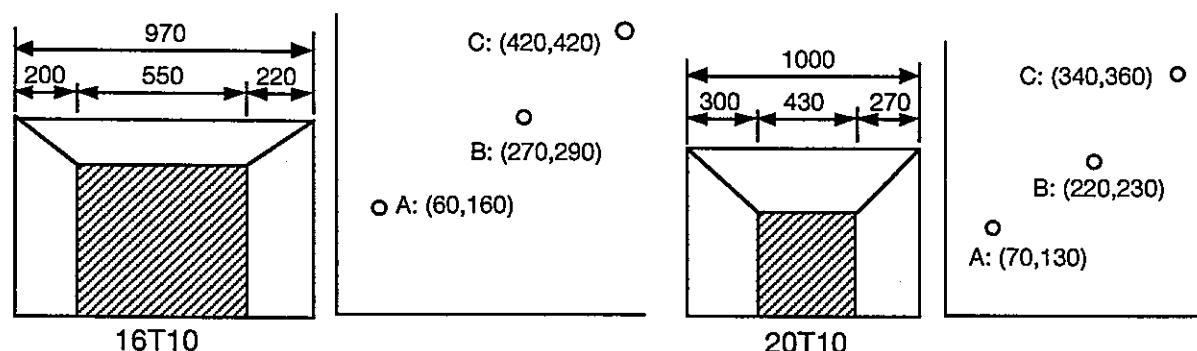
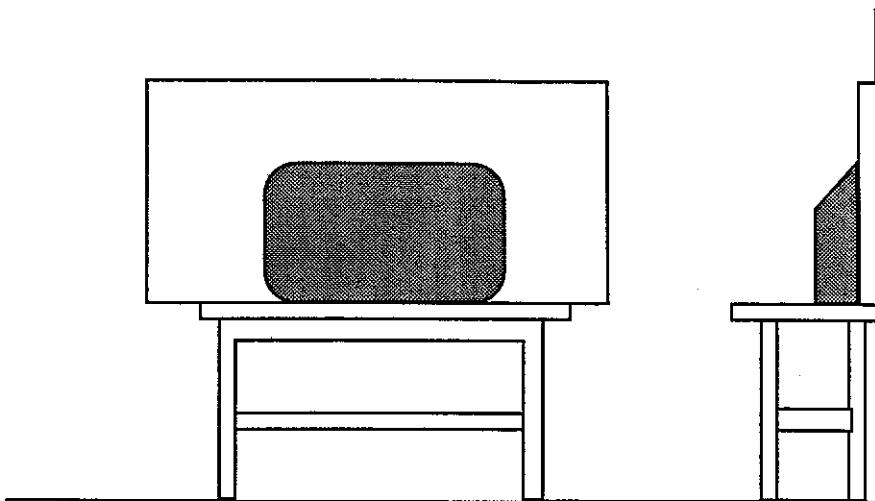


図-3.3 サンプリング位置
(図の座標値は吹付盛上がり場(斜線部)における座標を示す)

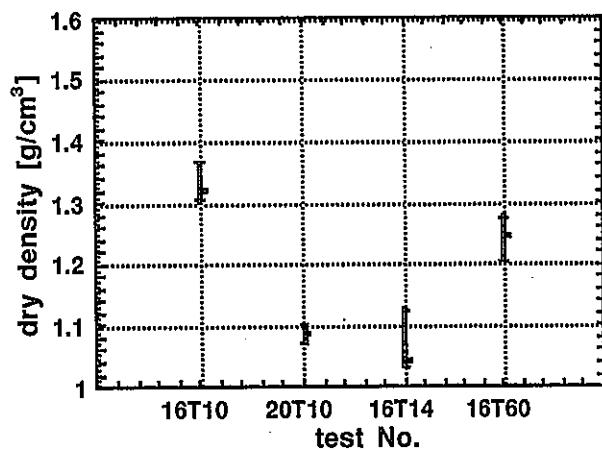


図-3.4 試験条件と乾燥密度の関係

吹付のみによる乾燥密度の分布を図-3.4に示す。同一試験条件でのサンプリング位置による値のばらつきは最大 $0.09\text{g}/\text{cm}^3$ と小さく、ほぼ同程度の乾燥密度が得られた。また、初期含水比 $W=16.5\%$ の場合の方が $W=20.5\%$ の場合よりばらつきが大きい結果となった。

このことは、練り混ぜ時の緩衝材の含水比のばらつき、1回の吹付作業が数分間と短時間による圧送圧のばらつき、あるいはホース内での緩衝材の付着による圧送圧の変化等によるものと考えられる。吹付終了後のホース内の緩衝材付着状況を写真-3.2に示す。

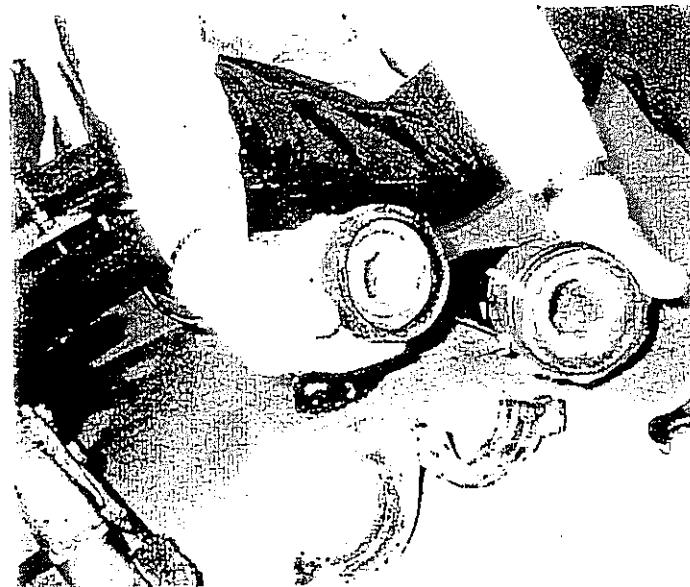


写真-3.2 ホース内の閉塞状況

また、本試験で得られた緩衝材の含水比と乾燥密度の関係を図-3.5に示す。本試験の範囲において取得された含水比と乾燥密度の間には明瞭な相関関係は認められなかった。

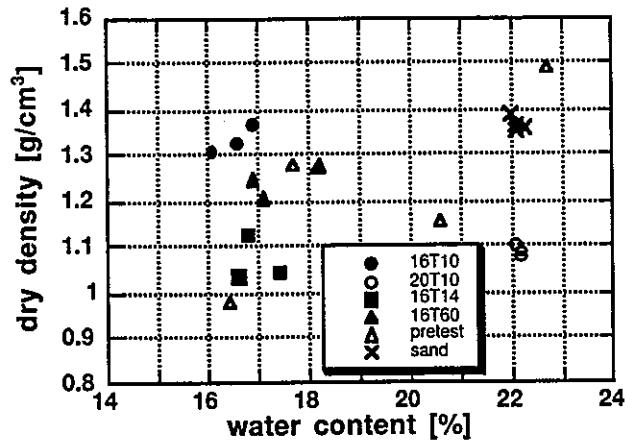


図-3.5 緩衝材の含水比と乾燥密度の関係

3.4 吹付転圧試験

吹付試験で得られた乾燥密度は、最大で $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、低いものでは $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 強であった。廃棄物の地層処分システムにおける緩衝材施工及び坑道閉鎖技術においては、緩衝材及び埋め戻し材は可能なかぎり高密度で充填されることが性能評価上優利であると考えられる。そこで、本試験で吹付けた試験供試体に2次的な力を加えることにより乾燥密度をどの水準まで上げることが可能であるかを把握するため、吹き付け後の試料を用いた現地締固め試験を実施した。試験は、吹付けた試料からブロック状の試料を採取し、コンクリート床の上に整地した後、電動タンピングランマー（写真-2.5）により締固めることとした。

試験の手順は、鉛直下向きに厚さ10cm程度のブロック状の試料を置き、およそ15秒にわたり転圧により締固め、これを1層とした。この作業を3層にわたって実施した。得られた締固め試料においてサンプリングを実施し、乾燥密度および含水比の測定を行った。得られた関係を図-3.6に示す。本試験では、現地締固め中の試料周囲の拘束は行わず、フリーの状態とした。

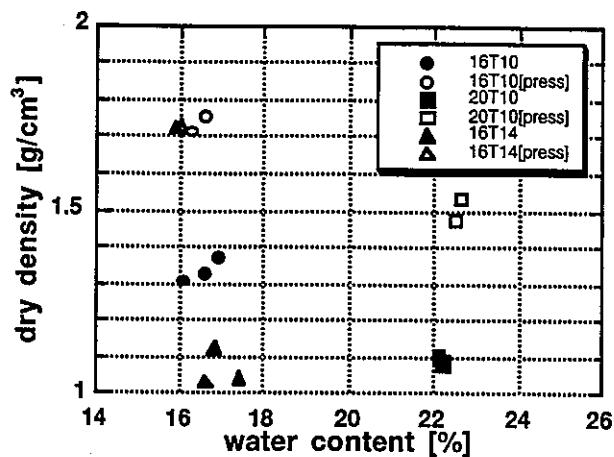


図-3.6 吹付転圧試験結果

試験の結果、設定初期含水比がW=16.5%の試料は締固めることにより乾燥密度1.7g/cm³を達成することが出来た。また、設定初期含水比W=22.0%の試料は乾燥密度1.5g/cm³となった。吹付試験の結果の乾燥密度からの変化率は試料16T10, 20T10, 16T14においてそれぞれ129%, 138%, 162%と高い改善率を示していることが分かった。したがって、吹付作業で所要の乾燥密度が得られない場合においても、適度な締固めエネルギーを加えることにより、緩衝材の乾燥密度を高められることを確認できた。

4. まとめと今後の課題

4.1 まとめ

廃棄物の処分システムにおける緩衝材施工及び坑道閉鎖技術開発の一環として、混合ペントナイトの吹付工法による固着試験を実施し、吹付材料と密度および含水比との関係を測定した。

本試験は、締固め試験、予備吹付試験、吹付試験および吹付転圧試験で構成し、以下の知見が得られた。

(1)最適含水比およびこれを越える含水比の範囲において、コンクリート吹付機による緩衝材の吹付作業が可能であることが確認できた。

(2)含水比W=16.5%のように水量が少ない場合には、練り混ぜ時に塊状の粒子はほとんど形成されないが、吹付作業時に粉塵が見られた。一方、含水比W=16.5%を越えて水量が多くなると、塊状粒子は大きくなり、しかも、その量も多くなつたが、吹付作業時の粉塵は解消された。

(3)吹付作業により得られた緩衝材の乾燥密度は、 $1.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ の範囲であった。

(4)緩衝材を吹付けた後に別途締固めを行うことにより、 $1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 程度の乾燥密度を得ることが出きることを確認できた。

4.2 今後の課題

本試験により、吹付工法を用いた緩衝材の固着性能の概要を把握することができるとともに、吹付工法による緩衝材の施工方法の可能性を確認出来た。

緩衝材の施工方法を確立するうえで、今後検討すべき課題を以下に示す。

1. 緩衝材の配合

緩衝材の配合は、吹付工法における作業性（圧送ホース内の閉塞性、粉塵、リバウンド量、ロス時間）、および緩衝材の品質（乾燥密度）、出来形（後工程である締固め作業に関連する表面の凸凹）に及ぼす影響が大きいと考えられる。したがって、吹付工法に適した配合を選定することが重要である。

配合を選定する場合には、吹付作業の位置付け、目標密度、等を充分に検討し、施工性の向上およびコストの低減を図ることが必要であると考えられる。また、最適配合を選定するパラメータとして、本試験では実施しなかった混合珪砂の種類（粒度分布）、および吹付条件（圧送距離・時間、吹付距離）等についても検討する必要があると考えられる。

2. 緩衝材の閉塞対策

本試験では、全吹付量が 1m^3 以下と少量であったが、試験終了時にはホース内に緩衝材が付着しており、閉塞の兆候が認められた。

一般に、吹付作業において、ホース内の清掃によるロス時間の全作業時間に閉める割合は大きい。とくに、本試験で対象としているような緩衝材は、粒径が細かく、粘性が高いうえに水洗いによる除去が困難であることから、閉塞対策について検討する必要があると考えられる。

3. 吹付転圧方法の検討

本試験における試験ケース数は少ないが、吹付工法のみでは 1.5g/cm^3 以上の乾燥密度を得ることは困難であると考えられる。したがって、吹付後に適切な締固めエネルギーを加えて、より高密度の充填を得るために、水平横方向に締固める方法および機器を開発する必要があると考えられる。

参考文献

- 1)動力炉・核燃料開発事業団；高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-, PNC TN1410 92-081, 1992
- 2)鈴木英明他；緩衝材の特性試験(I), PNC TN8410 92-057, 1992
- 3)動力炉・核燃料開発事業団；動燃技報, No. 85, PNC TN1340 93-001, 1993
- 4)Sato.S., Kobayashi. A., etc ; Full Scale Test on Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Process in Engineered Barrier System, '91 Joint International Waste Management Conference, ASME. Seoul, Korea, Oct., 1991

謝辞

今回の試験の実施に当たっては、株式会社間組の雨宮清氏をはじめ多数の方々に多大のご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。