

博士論文

ベントナイトペレットを用いたすき間充てんの研究

2015年3月

中島均

岡山大学大学院
環境生命科学研究科

要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイトと呼ばれる膨潤性粘土で構築される緩衝材は重要な人工バリアのひとつであり、施工時に緩衝材の周囲に発生するすき間は、適切に処理しなければ緩衝材の品質を損なうなどの悪影響を生じる恐れがある。

本研究は、このようなすき間をベントナイトペレットを用いて充てんする技術を対象として、ベントナイトペレットの製造技術とベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術の確立を目的としたものである。

ベントナイトペレットの製造技術に関しては、充てん材料として有利と考えられる高密度なペレットを製造するための新たな製造方法を提案した。比較的水分が多い状態で市販の粉体加工機器を利用して球形の湿潤ペレットを製造し、それを乾燥収縮させることで高密度なベントナイトペレットが製造する方法である。製造実験を行い、ベントナイトで球形なペレットが製造可能であること、ゆっくり乾燥させることで高密度化することなどを確認した。さらに、汎用の乾燥装置を想定して、乾燥温度などをパラメータとした乾燥実験を実施し、密度増加過程を検討することで、高密度なペレットを製造するためには、乾燥の初期に低温でゆっくり乾燥させることが重要であることや、ある程度乾燥が進んだ段階では高温で絶乾状態まで乾燥させることが、密度増加に有効であることが明らかになり、実際の製造技術の確立に資する知見が得られた。

すき間充てん技術に関しては、製造したベントナイトペレットを用いて、小規模充てん実験と、実寸規模充てん実験を行った。小型容器を用いた小規模充てん実験では、粒径の異なる2種類のベントナイトペレットを適切に混合することが高い充てん密度を得るために有効であり、粒径の差が大きいほど効果が高いことが明らかになった。最適な混合条件は40~60%程度であった。実寸規模充てん実験では、横置き定置方式の場合に生じる横方向すき間を実寸規模の型枠で模擬し、すき間の天端部にベントナイトペレットを吹込み、ペレットが自由落下することで、下部のすき間を充てんする方法を想定した。ペレット吹込み装置として、2種類の市販の粉体搬送装置（機械式と空圧式）を用いて実験を行った結果、ペレットの吹き出し速度が速い空圧式の搬送装置を用いると、最下部と天端部の一部を除いて、室内充てん実験で得られたと同等の充てん密度が確保できることが明らかになった。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 本論文の目的と構成.....	4
第2章 緩衝材の施工方法と周辺に発生するすき間の整理.....	7
2.1 ベントナイトの性質.....	7
2.2 緩衝材の仕様	8
2.3 緩衝材の特性	8
2.4 緩衝材の施工方法	14
2.5 緩衝材周囲のすき間とその取扱い	20
2.6 ベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術の必要性.....	22
第3章 乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法.....	26
3.1 はじめに	26
3.2 既存のベントナイトペレット製造技術と製造されるベントナイトペレットの特徴	26
3.3 乾燥収縮を利用した新たなベントナイトペレットの製造法.....	31
3.4 造粒実験と造粒時水分の影響（造粒実験）	36
3.5 乾燥実験と密度増加に与える乾燥条件の影響（乾燥実験）	39
3.6 3章の結論.....	44
第4章 ベントナイトペレット製造時の乾燥収縮挙動の検討	47
4.1 はじめに	47
4.2 乾燥工程の課題と課題解決に向けた考え方	47
4.3 乾燥実験の方法.....	49
4.4 乾燥実験の結果.....	53
4.5 考察.....	59
4.6 4章の結論.....	69
第5章 小型容器を用いたベントナイトペレットの充てん実験.....	71
5.1 はじめに	71

5.2	ベントナイトペレットと充てん容器.....	71
5.3	ペレット単独の充てん実験.....	73
5.4	2粒径混合ペレットの充てん実験.....	74
5.5	3粒径混合ペレットの充てん実験.....	77
5.6	2粒径混合ペレットの充てん性能に関する考察.....	79
5.7	他の充てん理論との比較に関する考察.....	82
5.8	5章の結論.....	87
第6章	実寸規模の横方向すき間充てん実験.....	89
6.1	はじめに.....	89
6.2	想定したすき間と実寸規模充てん型枠.....	89
6.3	充てん装置と充てん実験の方法.....	92
6.4	実験ケース.....	95
6.5	実験結果と考察.....	96
6.6	6章の結論.....	102
第7章	結論.....	104

目次

図 1.1-1	核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物（文献 3）より引用）	1
図 1.1-2	多重バリアシステムの構成要素と期待される機能（文献 5）より引用）	2
図 1.2-1	本論文の構成	5
図 2.3-1	乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの透水係数（文献 4）に加筆）	9
図 2.3-2	乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの膨潤圧（文献 5）より引用）	10
図 2.3-3	乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの膨潤ひずみ（文献 4）より引用）	11
図 2.3-4	圧縮ベントナイトの乾燥密度と有効粘土密度	12
図 2.3-5	ベントナイト含有率と乾燥密度から求めた有効粘土密度	13
図 2.3-6	圧縮ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係（文献 6）より引用）	13
図 2.4-1	人工バリアの設置方式（文献 1）より引用）	14
図 2.4-2	定置方式の違いによる抗道の使用形態（文献 7）より引用）	14
図 2.4-3	緩衝材の施工方法の分類（文献 9）より引用）	16
図 2.4-4	実規模の緩衝材ブロックの製作（文献 9）より引用）	17
図 2.4-5	真空吸引装置による実規模緩衝材ブロックの移動試験（文献 9）より引用）	17
図 2.4-6	重錘落下による緩衝材の締固め（文献 9）より引用）	17
図 2.4-7	緩衝材の吹付施工（文献 9）より引用）	18
図 2.4-8	PEM 容器の搬送試験の様子（文献 11）より引用）	19
図 2.5-1	縦置き処分方式におけるすき間の概念	20
図 2.5-2	PEM 処分方式におけるすき間の概念	20
図 2.5-3	緩衝材周囲のすき間の設定（文献 12）に加筆）	21
図 3.2-1	原鉱石破砕材料（クニミネ工業製クニゲル GX®）	27
図 3.2-2	原鉱石破砕材料（クニミネ工業製 OK ベントナイト®）	27
図 3.2-3	ブリケッティング法で製造されたベントナイトペレット	29

図 3.2-4	打錠法で製造されたベントナイトペレット.....	29
図 3.2-5	一軸圧縮により製造したベントナイトペレット	30
図 3.3-1	ベントナイトペレットの製造手順.....	32
図 3.3-2	押し出し造粒の概念.....	33
図 3.3-3	ダイスの例 (左 : 8mm 径、右 : 3mm 径)	34
図 3.3-4	押し出し造粒後の円筒形ペレット (8mm ダイスの例)	34
図 3.3-5	転動造粒の概念	34
図 3.3-6	転動造粒後の球形ペレット.....	35
図 3.3-7	乾燥前後のベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の関係.....	35
図 3.3-8	乾燥前後のベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の状態.....	36
図 3.4-1	押し出し径の違いによる混練時含水比	39
図 3.5-1	送風乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化	41
図 3.5-2	110℃炉乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化	41
図 3.5-3	50℃炉乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化	41
図 3.5-4	押し出し径の違いによる混練時含水比	42
図 3.5-5	含水比が 10%に至るまでの時間と完全乾燥時の乾燥密度.....	43
図 4.2-1	乾燥収縮の密度増加の概念 (文献 3) に加筆)	49
図 4.3-1	回転型送風乾燥方式の実用機 の概念 (文献 5) より引用)	50
図 4.3-2	乾燥方法の概念	51
図 4.3-3	乾燥容器	51
図 4.4-1	ベントナイトペレットの温度・湿度の経時変化 (ケース 1 ~ ケース 3) ..	55
図 4.4-2	ベントナイトペレットの温度・湿度の経時変化 (ケース 4 ~ ケース 5) ..	56
図 4.4-3	ベントナイトペレットの含水比の経時変化.....	57
図 4.4-4	ベントナイトペレットの乾燥密度の経時変化.....	58
図 4.5-1	ベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の関係.....	60
図 4.5-2	各乾燥条件における乾燥密度増加指数.....	62
図 4.5-3	乾燥時の土の状態変化 (乾燥収縮しない場合)	64
図 4.5-4	乾燥時の土の状態変化 (最も乾燥収縮する場合)	64
図 4.5-5	一般的な飽和粘性土の乾燥収縮挙動	64
図 4.5-6	乾燥中の任意の時点でのベントナイトペレットの状態図	65

図 4.5-7	含水比変化にともなうベントナイトペレットの体積変化	68
図 5.2-1	充てん実験に使用したベントナイトペレットの粒度分布	72
図 5.2-2	充てん実験に用いた小型容器	72
図 5.3-1	各粒径のベントナイトペレットの充てん密度	73
図 5.4-1	2粒径混合ペレットの充てん方法（5層交互投入法）	75
図 5.4-2	2粒径混合ペレットの充てん実験における充てん状況	75
図 5.4-3	小ペレットに1mmペレットを用いた場合の2粒径混合ペレットの充てん密度	76
図 5.4-4	小ペレットに2mmペレットを用いた場合の2粒径混合ペレットの充てん密度	76
図 5.4-5	小ペレットに4mmペレットを用いた場合の2粒径混合ペレットの充てん密度	76
図 5.5-1	1mmペレットと4mmペレットの混合した場合の充てん密度	78
図 5.5-2	3粒径混合ペレットの充てん密度	79
図 5.6-1	粒径比と最大充てん密度の関係	80
図 5.6-2	ペレットと空隙の状態図	81
図 5.6-3	2粒径混合ペレットにおける粒径比と最大充てん密度の関係	82
図 5.7-1	大きさの等しい球形粒子の規則充てん構造	82
図 5.7-2	単独ペレット充てん実験で得られた充てん率と充てん密度	83
図 5.7-3	大きさの異なる球形粒子の充てんの考え方	84
図 5.7-4	様々な形状の粒度分布	86
図 5.7-5	単独ペレット充てん実験で得られた充てん率と充てん密度	87
図 6.2-1	緩衝材周囲に発生するすき間の例（文献1）より引用）	89
図 6.2-2	緩衝材周囲に発生するすき間の断面図（文献1）より引用）	90
図 6.2-3	充てん型枠の概要	91
図 6.3-1	ラウンドブロー（エアブローノズル）	92
図 6.3-2	ラウンドブローを用いた充てん方法	92
図 6.3-3	ラウンドブローの場合のノズル位置	92
図 6.3-4	ラウンドブローを用いた充てん実験の全景図	93
図 6.3-5	エアロベイヤの概要	93

図 6.3-6	エアロベイヤを用いた充てん方法.....	94
図 6.3-7	エアロベイヤの場合のノズル位置.....	94
図 6.3-8	エアロベイヤを充てん型枠に挿入した状態.....	94
図 6.5-1	A 型枠の充てん実験の結果.....	97
図 6.5-2	B 型枠（300mm 高さ）の充てん実験の結果.....	99
図 6.5-3	B 型枠（100mm 高さ）の充てん実験の結果.....	99

表目次

表 2.2-1	緩衝材のリファレンス仕様.....	8
表 2.4-1	緩衝材施工方式の比較.....	15
表 2.5-1	すき間の処理方法の例（文献 12）より作成）.....	22
表 3.2-1	様々なベントナイトペレット製造方法（文献 4）より引用）.....	28
表 3.4-1	造粒実験における含水比条件と造粒の成否.....	37
表 3.5-1	乾燥実験における乾燥条件.....	40
表 4.3-1	乾燥実験の実験ケース.....	52
表 4.5-1	各ケースにおける密度増加指数.....	61
表 5.2-1	充てん実験に使用したベントナイトペレットの単体乾燥密度.....	72
表 5.4-1	実験ケース（2 粒径混合ペレットの充てん実験）.....	74
表 5.5-1	実験ケース（3 粒径混合ペレットの充てん実験）.....	78
表 5.6-1	ペレットの 50%通過粒径.....	80
表 5.7-1	Horsfield の充てん模型.....	84
表 6.4-1	A 型枠を用いた充てん実験の実験ケース.....	95
表 6.4-2	B 型枠を用いた充てん実験の実験ケース.....	96

第1章 序論

1.1 研究の背景

原子力発電によってさまざまな種類の廃棄物が発生する。その中でも高レベル放射性廃棄物は放射能レベルが極めて高く、安全なレベルになるまで数万年間を要するため、保管管理で対応するのは現実的でなく、隔離による最終処分を行う方向で国際的な議論がなされてきた。処分方法としては、過去には宇宙処分、氷床処分、海底処分なども検討されてきたが、現在では地層処分が最も信頼性が高い方法と考えられている。地下深部は、地表とくらべて地質学的に安定であり、地下水の動きも遅く、廃棄物を長期にわたって安定に保持できる機能があり、また深部であるため人間が接触する可能性がきわめて低く、テロや戦争などに対しても安全性が高いと考えられているためである^{1),2)}。

我が国においても、高レベル放射性廃棄物は地層処分することとなっており、そのための研究開発および処分事業の実施に向けた活動が進められている。高レベル廃棄物とは、国際的にみると使用済みの核燃料を指す国もあるが、我が国では図 1.1-1 に示すとおり核燃料サイクルを国策として推進しているため、再処理工程で発生する高レベル廃液もしくはこれをガラスと混ぜ合わせ安定化させたガラス固化体を指す³⁾。

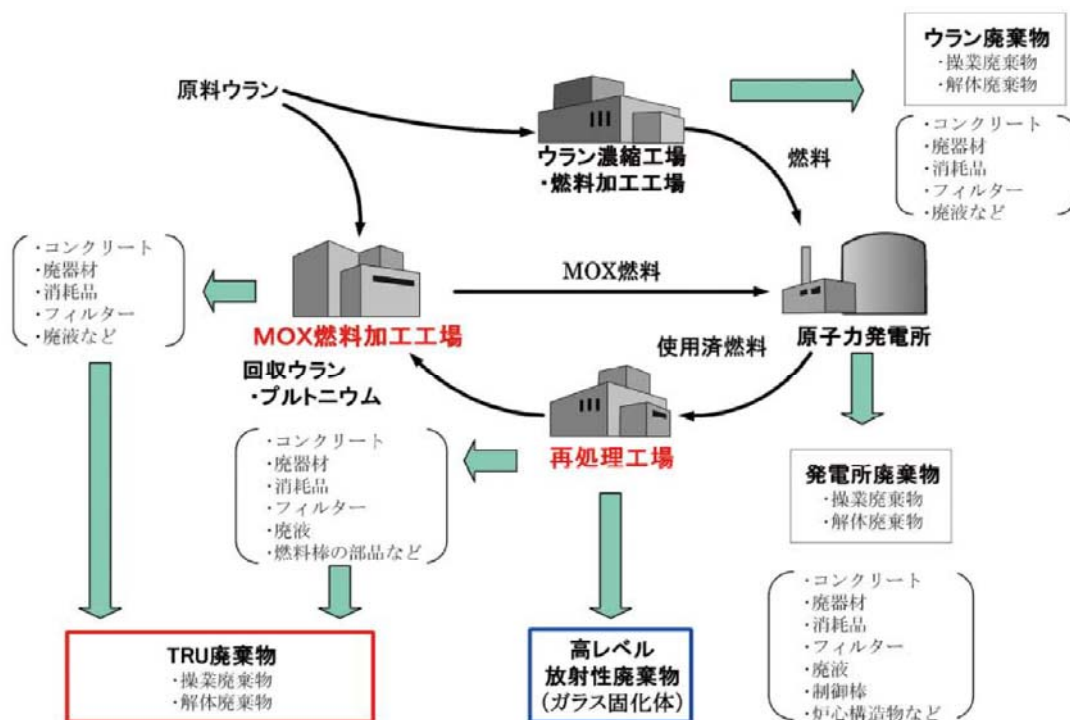


図 1.1-1 核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物 (文献3) より引用)

我が国における地層処分に関する研究開発は、1970年代半ばに動力炉・核燃料開発事業団（現日本原子力研究開発機構：以下、JAEA）において開始された⁴⁾。1999年には核燃料サイクル機構（現日本原子力研究開発機構）は、それまでの研究成果を集大成し、地層処分の技術的信頼性を示すための報告書（以下、2次とりまとめ）を取りまとめた⁵⁾。国はこれを技術的な拠り所として、2000年6月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」⁶⁾を施行した。同法律には、高レベル放射性廃棄物である高レベル廃液はガラス固化したのちに30～50年程度冷却し、地下300m以深の地層に処分することと明記されている。また、2000年10月には、処分実施のための実施主体として原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）が設立され、国やJAEAを中心とする研究機関と共同して高レベル放射性廃棄物の地層処分に向けた取り組みを進めている。

我が国の地層処分では、天然バリアとして機能する地層のみでなく、高レベル廃棄物の周囲に多層の人工的なバリアを配した多重バリアシステムが採用されることとなっている⁷⁾。その構成は図1.1-2に示すとおりであり、それぞれのバリアには異なる様々な機能が期待され、複合的に作用することで処分の安全性を確保する。



図 1.1-2 多重バリアシステムの構成要素と期待される機能（文献5）より引用）

このような人工バリアの中で緩衝材には、オーバーパックへの地下水の移行を抑制するための低透水性、オーバーパックの機能を担保するための地下水環境の維持、さらには緩衝材そのものの状態を維持する自己シール性などが期待されている。緩衝材の材料としては、天然に産出する粘土であるベントナイトが着目され、所定の密度にすれば性能を満足することが、これまでの研究により明らかにされている⁵⁾。

一方、緩衝材は他の人工バリアと異なり、設計の品質を確保することに課題が多い。それは多重バリアを構築するときの作業順序に起因している。地層に所定の空間が設けられ、そこにガラス固化体を格納したオーバーパックが定置される。緩衝材はその後で、空洞壁面とオーバーパックが作る空間に設置することとなる。緩衝材は所定の密度で設置しなければならないが、これを地下の狭隘な空間で、しかもオーバーパックからの放射線がある状態で行うためには、施工技術に関して十分な検討を行う必要がある。

緩衝材の施工方法として、いくつかの異なる方式が考えられている。粉体であるベントナイトを所定の密度にすることで性能を確保するため、どの時点で密度を確保するかが施工方法の基本的な違いである。例えば、所定の密度を確保した圧縮ブロックを先に成型し、それを所定の位置に定置する施工方法もあれば、所定の位置で締固めて直接、その場で密度を確保する施工方法も考えられる。それぞれに長所・短所があり、個別に実証的な研究開発が進められているものも多い。すなわち、緩衝材にどのような施工方法を適用するかについては、いまだ定まっておらず、複数のオプションが示されている⁸⁾。

このように検討が進められている複数の施工方法の中には、緩衝材の周囲にすき間が発生する方法もある。あらかじめ成形したベントナイトブロックを所定位置に設置する方法などではすき間の発生は避けられない。このようなすき間は適切に対処しなければ、地下水の通りみちとなる恐れもあり、緩衝材の性能を低下させ、多重バリアシステムの成立性に影響を与えることが懸念されている。すき間の取り扱いに関する検討は進んでおらず、緩衝材の施工方法の検討が進むにつれて、問題解決への注目が集まっている。

ベントナイトは水と接触することで膨潤する自己シール性がある。ベントナイトブロックを定置し緩衝材を構築する施工方法を選択した場合でも、周囲に発生するすき間の幅が狭ければ、緩衝材の膨潤ですき間を埋めるように設計することも可能である。しかし、周囲のすき間を狭くするためには高度な定置技術が必要である。このため、適切にすき間を充てんできる施工技術の確立が望まれている。

1.2 本論文の目的と構成

本論文では、緩衝材周囲に発生するすき間を対象とし、これをベントナイトペレットを用いて充てんする技術に関する研究をまとめたものである。具体的な内容としては、ベントナイトペレットの製造技術およびペレットを用いた充てん技術の2つを対象としている。第1章から第7章の7つの章で構成されており、各章の関係は図 1.2-1 に示すとおりである。

第1章では研究の背景と目的を示した。

第2章では、緩衝材の機能や緩衝材の特性をその材料であるベントナイトの性質とともに概説したうえで、緩衝材の施工方法について開発状況を示し、施工方法の違いによって発生するすき間について整理し、すき間充てんの必要性や本研究の位置づけなどを示した。

第3章では、新たなベントナイトペレット製造法として乾燥収縮を利用した方法を提案し、製造実験を行った結果を示し、適切な水分量で球形のペレットが製造できること、乾燥収縮を利用することで従来技術の代表である原鉱石破碎材料より密度の高いベントナイトペレットが製造できること示した。

第4章では、3章で示したベントナイトペレットの製造法の課題の中から、ペレットを高密度化させる乾燥工程について、品質向上や生産性向上に関連した課題の解決に向けて、乾燥温度や風速をパラメータとした乾燥実験を行い、乾燥収縮によるベントナイトペレットの密度増加過程を明らかにし、実際の製造技術の確立に資する知見を取りまとめた。

第5章では、第3章で提案した方法で製造したベントナイトペレットを充てん材料として、すき間充てん性能を把握するために、小型容器を対象として充てん実験を行い、粒径の異なる2粒径のベントナイトペレットを適切に混合することで、密度の高い充てんが可能であることを示した。

第6章では、これまで検討が行われていなかった横方向すき間を対象として、ベントナイトペレットの充てん方法を検討し、実寸法規模の充てん型枠を用いて充てん実験を行った結果を検討し、得られた知見を取りまとめた。

第7章では、本研究の結論と課題を示した。

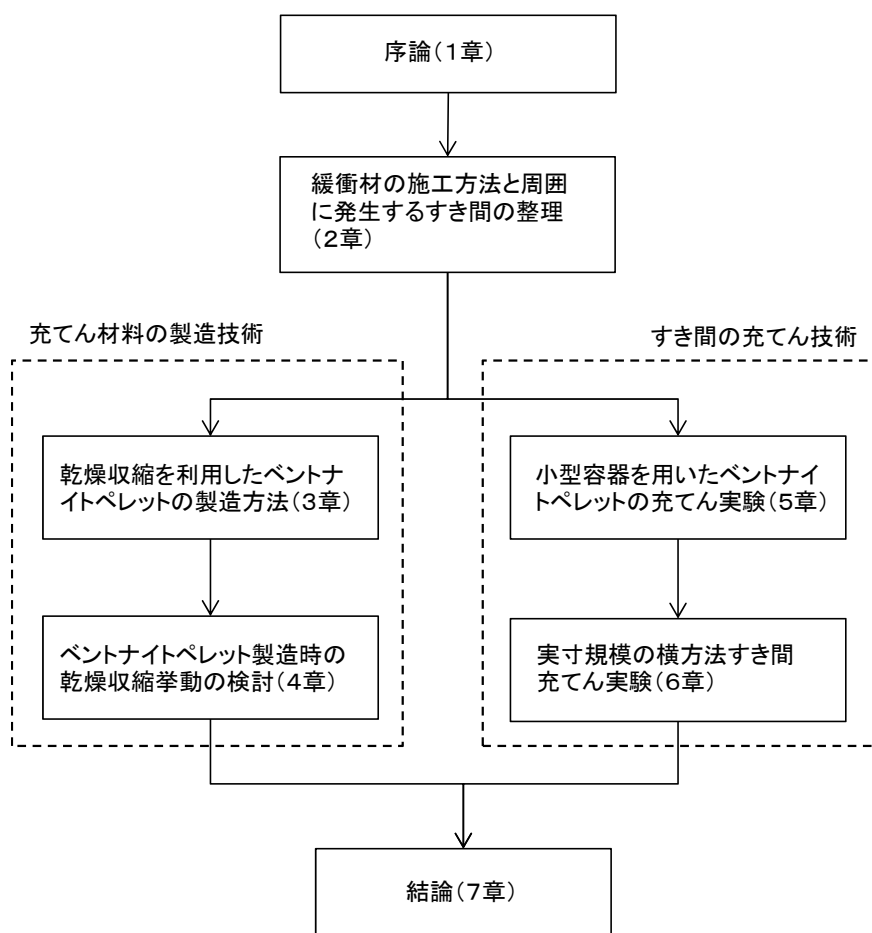


図 1.2-1 本論文の構成

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：TALK. 考えよう、放射性廃棄物のこと。～原子力エネルギーの未来のために、地層処分～，パンフレット，2009.
- 2) OECD/NEA: Progress towards Geologic Disposal of Radioactive Waste: Where do We Stand? An International Assessment, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France, 1999.
- 3) 経済産業省 資源エネルギー庁：高レベル放射性廃棄物の地層処分について考えてみませんか，パンフレット，2008.
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁・(独)日本原子力研究開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画，2009.

- 5) 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－総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 6) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律第百十七号）, 2000. (<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12HO117.html>)
- 7) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する計画(平成20年3月14日閣議決定), 2008.
- 8) 原子力発電環境整備機構:地層処分事業の安全確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-11-01, 2010.
- 9) 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー基本計画, 2014.

第2章 緩衝材の施工方法と周辺に発生するすき間の整理

2.1 ベントナイトの性質

ベントナイトは緩衝材の材料として有望視されてきた。事実上、緩衝材の研究開発はそのほとんどがベントナイトを想定し行われていると言ってもよい。ベントナイトは天然に産出する粘土である。日本のみならず、広く世界で産出する。鑄型の粘結材、農薬や化粧品材料、ボーリングの泥水などの幅広い業種で利用されている。

鉱山から採掘したベントナイト原鉱石は、段階的な破碎と乾燥が行われ、最終的には粉砕されて粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の粉体材料として流通することが多い²⁾。原鉱石のときには数10%の水分を持っており、これを乾燥して10%前後まで低下させる。このようにベントナイトは天然の土質材料を乾燥させただけの材料なので長期の安定性が期待できる。超長期にわたって所定の性能を維持しなければならない地層処分において、緩衝材の候補材料として考えられている理由のひとつである。

ベントナイトは主要鉱物としてモンモリロナイトを多く含む粘土であり、随伴鉱物として石英、長石、方解石、ゼオライトなどを含む。緩衝材としてベントナイトに期待されている性質は低透水性、膨潤性、核種吸着性などであり、これはモンモリロナイトの性質に由来している。粘土鉱物は総じて低透水性であり吸着性を持つが、その中でもモンモリロナイトは高い膨潤性を有していることが特徴である。膨潤性とは外部から水を取り込み、見かけの体積が増加する性質である。

モンモリロナイトの結晶は、非常に薄いシート状であり、通常は数枚が重なるように存在する。それぞれのシートの表面は常に負に帯電しており、このため層間（シートとシートの間）には Na^+ や Ca^{2+} などの陽イオンが存在する。陽イオンの種類は鉱床などで異なる。これらの陽イオンは交換性があるため交換性陽イオンと呼ばれている。層間には水分子が配向しており、外部から層間へさらに水分子が取り込まれると、層状のモンモリロナイト集合体は見かけの体積が増加し、ベントナイトとして膨潤性を示すことになる³⁾。

膨潤性は交換性陽イオンの種類によって異なり、 Na^+ を多く含むモンモリロナイトは膨潤性が高く、これを主成分とするベントナイトを Na 型ベントナイトと呼んでいる。緩衝材の材料には Na 型ベントナイトが適しており、緩衝材の研究開発では国産の代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1（クニミネ工業製）を中心にデータ取得が行われている。

2.2 緩衝材の仕様

緩衝材には、低透水性、膨潤性、核種吸着性などのさまざまな機能が期待されている。低透水性は、オーバーパックへの地下水の接触を抑制し、核種の地層への移行を抑制する。膨潤性は施工時に発生する周囲のすき間や、緩衝材内部に発生する想定外のすき間を修復する自己シール性を発揮する。また、核種吸着性は廃棄体から溶出する放射性核種の移行遅延などに寄与する¹⁾。

ベントナイトは、このような緩衝材の機能を満足する材料として期待されている。ベントナイトもしくはベントナイトに砂を混合し、ある程度の密度に締固めることによって、緩衝材が作られる。表 2.2-1 が緩衝材の仕様例として示されており、この仕様をリファレンスとしてさまざまな研究開発が行われている²⁾。なお、この仕様は確定的なものではなく、今後の研究開発の進展にともなって変更されることも視野に置いて研究開発は行われているが、現状では概ね妥当なものと考えられている。

表 2.2-1 緩衝材のリファレンス仕様

仕様	設定値
材料（重量比）	ベントナイト 70% : 砂 30%
乾燥密度	1.6 Mg/m ³
厚さ	70cm

2.3 緩衝材の特性

緩衝材の特性は、乾燥密度や砂の配合率の違いによって変動する。ここでは主要な特性である透水性や膨潤性について傾向を整理した。特に、緩衝材の施工技術や緩衝材周囲のすき間の問題を議論する場合には、すき間を膨潤により埋める考え方もあるため、膨潤による密度低下などに着目する必要がある。

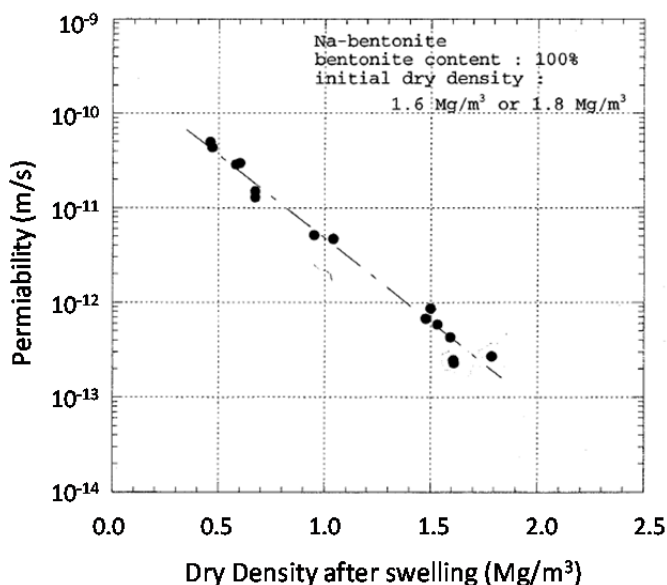
2.3.1 低透水性（透水係数）

緩衝材である砂配合のベントナイトの性能は、乾燥密度や砂配合率によって変動する。図 2.3-1 は、ベントナイトとして国産の代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1（クニミネ工業製）を用いた場合の透水係数の例である⁴⁾。図 2.3-1(a)はベントナイトのみの場

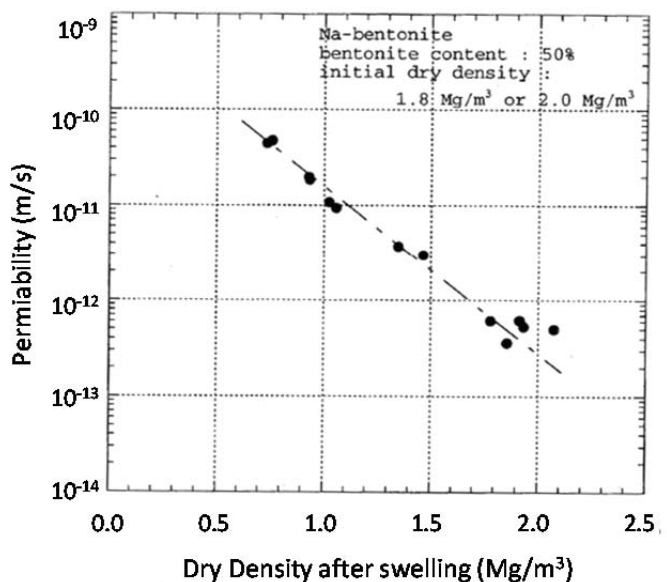
合を、図 2.3-1(b)はベントナイトと砂の重量割合が 50:50 の場合である。また、これらのデータは、乾燥密度 $1.6\text{Mg/m}^3 \sim 2.0\text{Mg/m}^3$ で成型した圧縮ベントナイトを一定荷重のもとで膨潤変形させ、膨潤することによって乾燥密度が低下した時点での透水係数を測定している。異なる荷重条件で膨潤させたので、さまざまな乾燥密度の透水係数が得られている。

両グラフともに、乾燥密度が高ければ透水係数が小さいことがわかる。また、2つのグラフを比較すると、砂を 50%混合したベントナイトは、砂を混合しない場合に比べて、同じ乾燥密度でも透水係数が大きいことがわかる。すなわち、砂を配合した場合は同じ密度でも透水係数が増加する。

試験した範囲では、透水係数は3オーダー程度の違いがあり、所定の低透水性を得るためには、適切な配合や密度を確保する必要があることが示唆される。地層処分における緩衝材の透水係数としては、 $1 \times 10^{-12}\text{m/s}$ 程度が目安である。配合については施工時に確定されるが、乾燥密度は膨潤変形を許容すると低下するため、緩衝材周囲のすき間を膨潤によって埋めることになる場合には注意が必要である。



(a) ベントナイト 100%



(b) ベントナイト 50%+砂 50%

図 2.3-1 乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの透水係数 (文献 4) に加筆

2.3.2 膨潤性

ベントナイトの膨潤性は自発的に水を吸収し膨張する性質のことを指す。この性質は供試体の周囲を拘束していない状態では体積膨張を示すが、拘束状態では体積膨張できないため外部へ作用する圧力を生じる。この圧力は膨潤圧と呼ばれる。

緩衝材の自己シール性、すなわち、地震などの想定外の事象によって緩衝材にすき間や亀裂などが生じても、それらが修復される機能はベントナイトの膨潤性によってもたらされている。自己シール性は緩衝材の低透水性を維持する役割もはたす。また、緩衝材と岩盤との界面などでは、地下水の通り道となり易いことも想定される。しかし、地下水が浸潤すると緩衝材には膨潤圧が発生するため、界面の透水係数が増加することを防ぐと考えられている。さらに、膨潤性は緩衝材そのものの低透水性の発揮に大きく関与している。緩衝材は施工直後には不均質性も残っていると考えられ、膨潤性がない場合、密度が低い箇所を選択的に地下水が通過し、全体の透水係数が大きくなる恐れがあるが、膨潤性があるため緩衝材全体が均質化し低透水性を示すことになる。

図 2.3-2 は小峯により取得された膨潤圧の結果⁵⁾である。円筒形の供試体の下部を水と接触させ、上部にロードセルを

設置し、圧力を計測している。この圧力が膨潤圧である。供試体は不飽和状態であり、初期には供試体内に水が浸潤し、これとともに膨潤圧も次第に上昇していく。最終的には供試体は飽和状態となり、膨潤圧も最大値に近づく。図に示した最大膨潤圧は計測された膨潤圧のうち最大値を示しており、最終膨潤圧ではない。供試体によっては最終膨潤圧が最大膨潤圧より小さくなる場合があるためである。これは供試体内部の

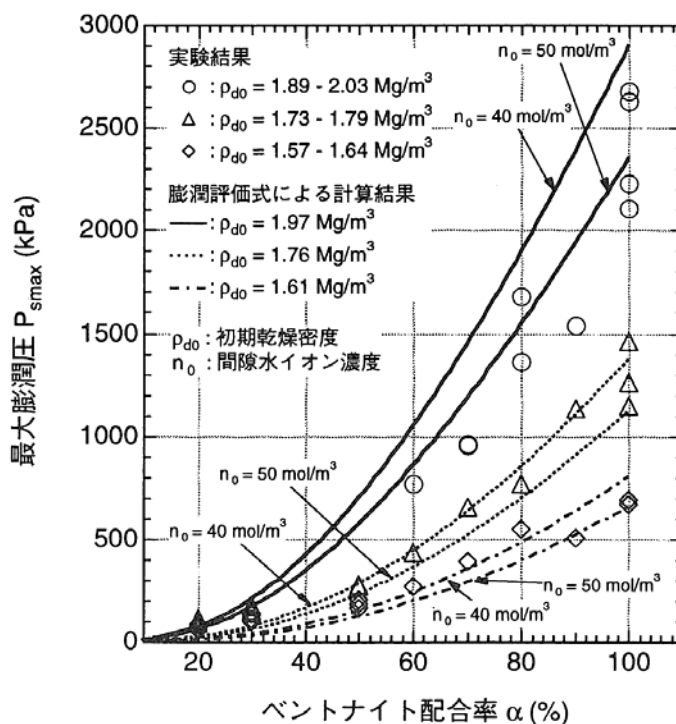
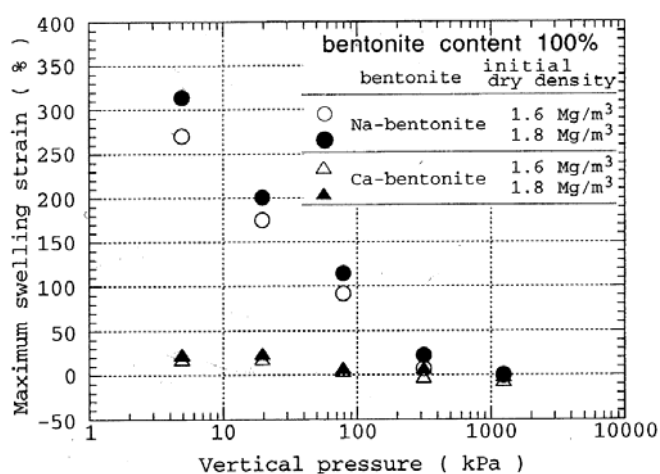


図 2.3-2 乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの膨潤圧 (文献 5) より引用)

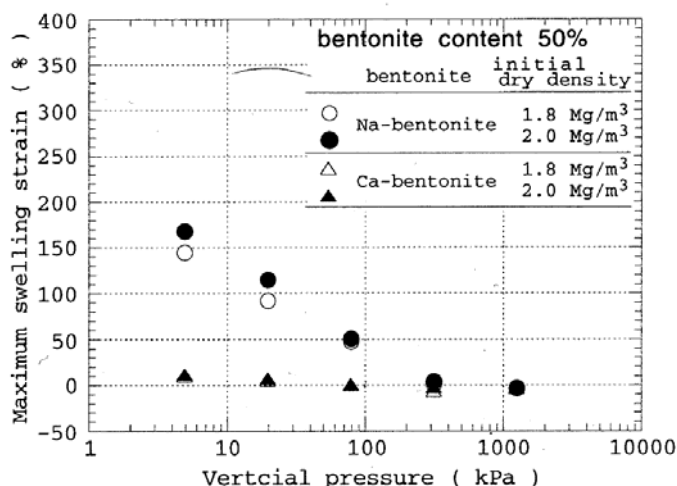
粒子の再配置などによる説明が試みられている。図 2.3-2 よりベントナイト配合率が高いほど、また、乾燥密度が高いほど膨潤圧が大きいことが確認できる。膨潤圧の最大値は 2～3MPa 程度であり、ベントナイトのみを乾燥密度 1.89～2.03Mg/m³に締固めた状態で得られている。このように体積変化を拘束した状態では、膨潤圧は、緩衝材の乾燥密度とベントナイト配合率に依存する。

一方、図 2.3-3 は体積変形を許容した場合の膨潤性を確認した例である⁴⁾。縦軸は膨潤ひずみを示している。実験は円筒供試体を側方拘束して実施されているので、膨潤ひずみは初期高さに対する膨潤後の高さ増分を示す。横軸には載荷圧をとっている。

図 2.3-3(a)のナトリウム型ベントナイト（図中で Na-bentonite の表記, 使用したベントナイトはクニゲル V1 : クミネ工業製）に着目する。載荷圧が大きければ膨潤ひずみが発生せず、載荷圧が小さい場合は膨潤ひずみが大きいことがわかる。1MPa 程度の載荷圧では膨潤ひずみはほとんど計測されておらず、体積拘束した場合に発生する膨潤圧と同程度の載荷圧で吸水させた場合には膨潤変形が起きないことが確認できる。また、数 kPa と膨潤圧より 3 オーダー程度小さい載荷圧では、供試体は 300%もの膨潤ひずみを示しており、体積が 4 倍に膨張することがわかる。



(a) ベントナイト 100%



(b) ベントナイト 50%+砂 50%

図 2.3-3 乾燥密度および配合率が異なるベントナイトの膨潤ひずみ（文献 4）より引用）

このように発生する膨潤ひずみは、図 2.3-3(a)と図 2.3-3 (b)を比較すると、供試体の初期条件にも依存していることがわかる。すなわち、初期の乾燥密度が大きいほど、また、ベントナイト配合率が大きいほど、膨潤ひずみは大きい。なお、Ca-bentonite では同じ条件でも膨潤ひずみは極端に小さいことも、併せて確認できる。

2.3.3 有効粘土密度による整理

これまでに述べたように、緩衝材の主要な特性である透水性や膨潤性は、乾燥密度と配合率の双方に依存している。つまり、配合率を変えた場合には、緩衝材の特性を乾燥密度だけで評価できない。乾燥密度と配合率の代わりに、有効粘土密度を用いると、緩衝材の特性を統一的に評価できる可能性が高いことが知られている。

有効粘土密度は、ベントナイトに加えられた砂分を除いた空間における、ベントナイトの乾燥密度のことである。乾燥密度と有効粘土密度の考え方の違いを図 2.3-4 に示す。透水性や膨潤性を支配しているのはベントナイト部分の乾燥密度であり、加えられた砂はこれに寄与していない、という考え方である。有効粘土密度はベントナイト含有率と乾燥密度を決めれば一意に決まり、それらの関係は図 2.3-5 のようになる。前述したように緩衝材のリファレンス仕様として考えられているのは、砂を 30%配合して乾燥密度 1.6Mg/m^3 とした材料なので、有効粘土密度に換算すると図中に示すように 1.37Mg/m^3 である。

図 2.3-6 は有効粘土密度で砂ベントナイトの透水係数を整理した例である。図には性能の異なるいくつかのベントナイトが含まれていることや、透水係数が小さくなることが知られている塩水を通水した場合のデータも含まれているため、バラツキが大きく認められるが、おおよそ有効粘土密度で透水係数が評価できることがわかる。なお、膨潤性についても、同様に有効粘土密度で評価できることが明らかになっている。

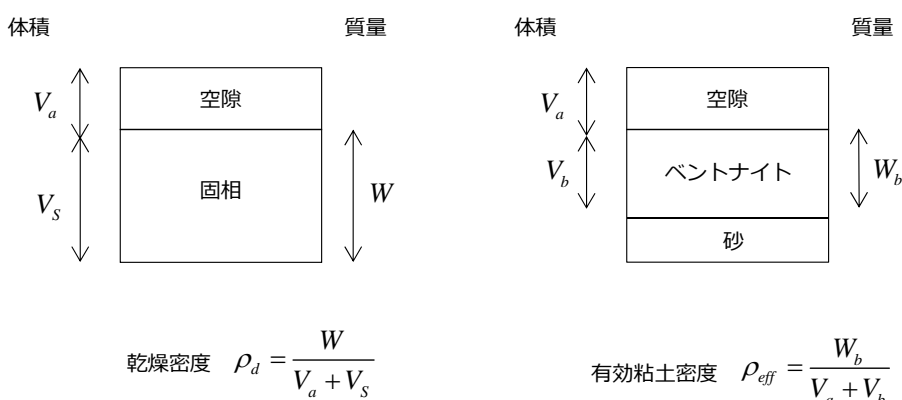


図 2.3-4 圧縮ベントナイトの乾燥密度と有効粘土密度

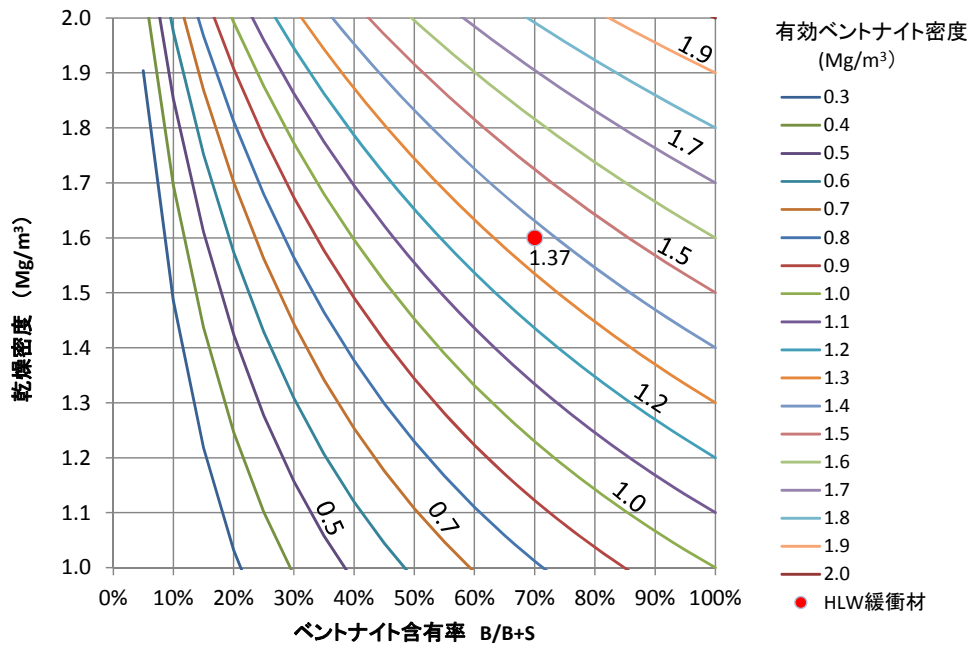


図 2.3-5 ベントナイト含有率と乾燥密度から求めた有効粘土密度

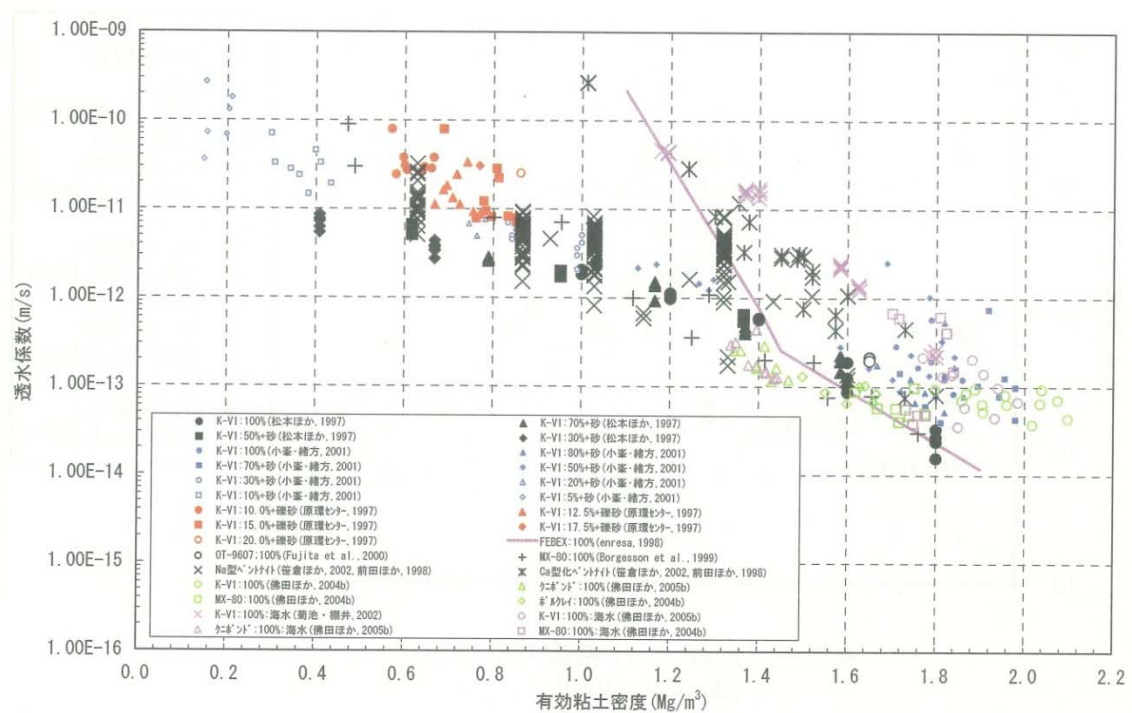


図 2.3-6 圧縮ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 (文献 6) より引用

2.4 緩衝材の施工方法

2.4.1 人工バリアの設置概念

ガラス固化体を格納したオーバーパックは、地層中で所定の位置に定置される。オーバーパックは円筒形で、水平に定置する場合と、鉛直に定置する場合の2通りが考えられる。どちらの方向で定置するのかは決まっておらず、現段階では並行して検討が進められている。オーバーパックの定置方向が異なれば、定置するための空間や緩衝材の形状も変わる。図 2.4-1 はそれぞれの定置方向での、人工バリアの設置形態を示したものである。それぞれ横置き方式、縦置き方式と呼ばれる。さらに、定置方向の違いによって、図 2.4-2 に示すように坑道の形態も異なる。横置き方式を採用した場合には処分坑道に直接、オーバーパックや緩衝材が設置される。一方、縦置き方式では処分坑道の下部に処分孔を設け、そこに定置することになる。どちらの方式を選択するかによって、施工の難易度が異なる。横置き方式のほうが難しいと考えられているが、坑道の掘削量が少ないのでトータルの処分費用が抑えられる効果が高いことも指摘されている。

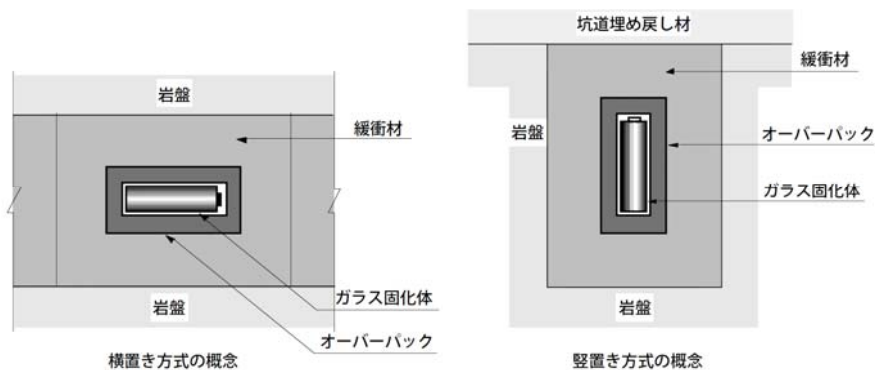


図 2.4-1 人工バリアの設置方式（文献 1）より引用

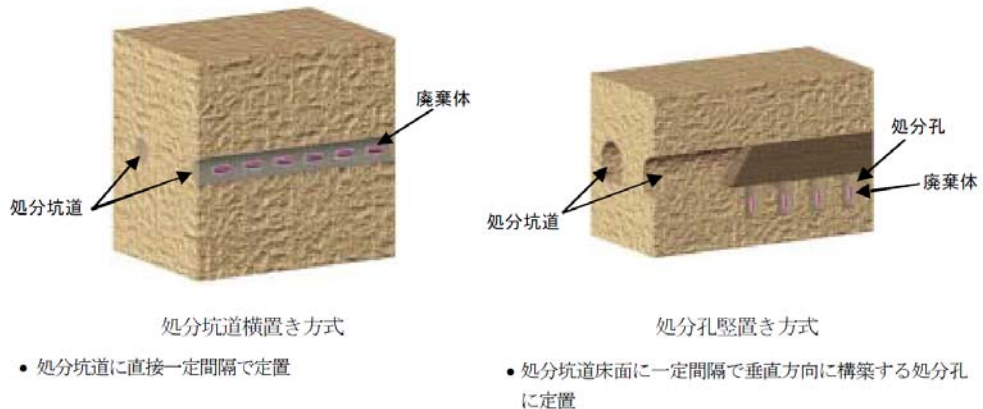


図 2.4-2 定置方式の違いによる坑道の使用形態（文献 7）より引用

2.4.2 緩衝材の施工概念

図 2.4-1 に示したように 3 種類の人工バリアを所定の配置どおりに実現するためには、緩衝材の施工方法を確立することが重要である。緩衝材は他の人工バリアと異なり、設計品質の確保に施工方法が与える影響が大きい。それは人工バリアが施工手順の中で最後に実施されることと関連がある。所定の空洞を地層に設け、所定の位置にガラス固化体を格納したオーバーパックを定置し、最後に地層とオーバーパックとの間の空間に緩衝材を設置するのが現実的な施工順序である。空洞の施工は従来の土木技術の延長で十分対応できると考えられるし、オーバーパックは地上で工場製作される。しかし、緩衝材の施工は地下で行わなければならないこと、対象空間が狭いことや、性能を発揮するために所定の密度を確保しなければならないことから、施工の難易度が高い。

緩衝材の施工方法を大きく 2 つに分けると、ベントナイトブロック方式と原位置締固め方式となる。ベントナイトブロック方式は、あらかじめ高圧プレス等で、砂とベントナイトを混合した材料を所定の密度のブロックに成型し、このベントナイトブロックを所定位置に定置する方法である。これに対して、原位置締固め方式は、砂とベントナイトを混合した粉体材料を直接、現位置で締固め、所定密度の緩衝材を構築する方法である。2 つの施工方式の大きな違いは、所定の密度をどの時点で確保するかである。2 つの方式の特徴を整理すると、表 2.4-1 のとおりである。なお、この整理は縦置き方式の場合を想定して行っており、横置き方式の場合は、どちらの施工方法でも、さらに難易度が上がると考えられる。

表 2.4-1 緩衝材施工方式の比較

施工方式	長所	短所
ベントナイトブロック	高密度の緩衝材ができる。	定置技術の難易度が高い。 緩衝材周囲にすき間が発生する。
原位置締固め	岩盤と密着する緩衝材施工が容易	密度バラツキが生じやすい 高密度の緩衝材に対応しにくい

2.4.3 実現可能な施工技術の開発

国の基盤研究では、実現可能な選択肢を幅広く整備する視点に立ち、さまざまな緩衝材の施工技術を対象に実証的な研究開発が行われた⁸⁾。個別の施工技術の研究開発に先立ち、図 2.4-3 に示すように緩衝材施工技術が分類された⁹⁾。定置方式(縦置き方式/横置き方式)と施工方式(ブロック定置/原位置締固め)の組み合わせで8種類に分類しているのは、施工方式が同じであっても、定置方式が異なれば、開発要素や難易度が異なると考えられたからである。

施工方式の分類においては、ブロック定置方式は、従来型の分割ブロック定置方式に加え、一体型ブロック(モノリス型)に分けられている。さらに、粒状のベントナイトを流し込む方式が加えられている。

また、代替技術としてブレアセンブリ方式も開発対象として考えられた。ブレアセンブリ方式の PEM 方式(Pre-Fabricated Engineering Barrier System Module)とは、緩衝材を含むすべての人工バリアを、地上にて金属容器にパッケージ化し、そのうえで地下の所定の位置に定置する方式である。

研究開発は実現可能性が高いものから優先的に行われた。以下に、主要な施工方式について概説する。

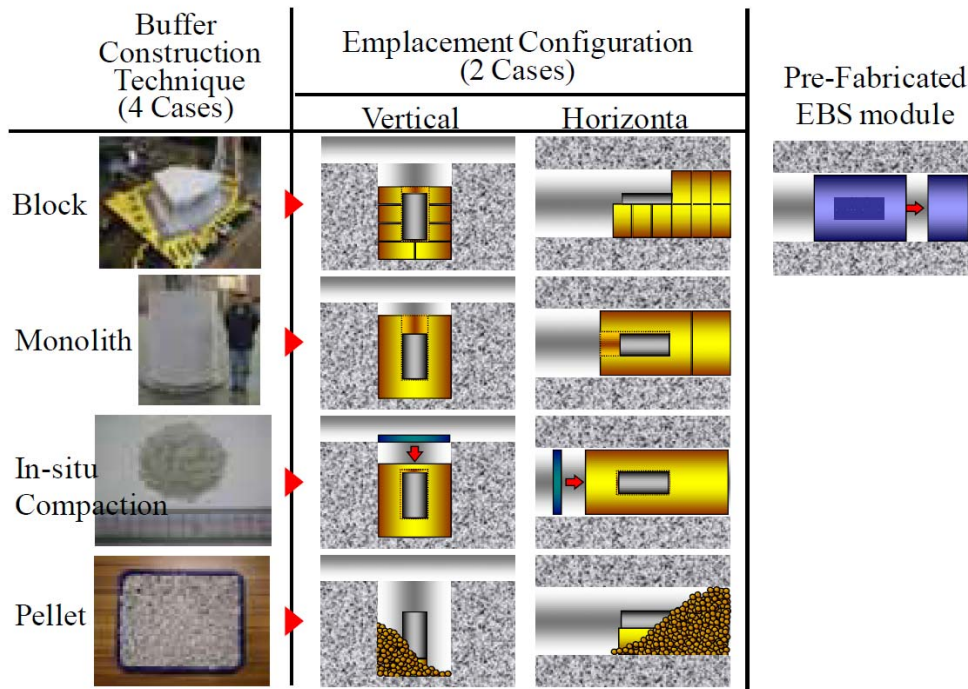


図 2.4-3 緩衝材の施工方法の分類 (文献 9) より引用)

(1) 縦置き／分割ブロック定置方式

緩衝材の施工方式としては、机上検討の段階から実現性が最も高いと考えられていた施工方法である。縦置き処分方式を対象に研究開発が行われた。所定密度の緩衝材ブロックは、円周方向に8分割して1個当たりの圧縮面積を小さくすれば、2000トンの静的プレス機で製造可能なことが確認された。

図 2.4-4 は実際に製造されたベントナイトブロックである。

本方式では、所定の位置にベントナイトブロックを定置して緩衝材を構築すること、すなわち定置技術の確立が主要な課題であった。緩衝材の側部のすき間はなるべく狭いほうがよいので、ブロックの下部や側部を把持する方法は好ましくない。このような問題を解決するために、ブロック上部を真空吸引装置で把持する技術が検討された。図 2.4-5 に示すよう真空吸引装置でベントナイトブロックが安全に移動できることを確認し、この方式による定置技術が実現可能であることを示した。

(2) 縦置き／原位置締固め方式

縦置き処分方式を対象に開発が行われた。緩衝材を現位置で締固める方法として、静的圧縮、衝撃締固め、突固めなどが考えられるが、図 2.4-6 に示すような重錘落下方式の実現可能性を検討した。シャフトに取り付けられた2.1トンのイチョウ型の重錘を自由落下させることで、所定の密度の緩衝材が構築可能であることが確認された。



図 2.4-4 実規模の緩衝材ブロックの製作（文献9）より引用）



図 2.4-5 真空吸引装置による実規模緩衝材ブロックの移動試験（文献9）より引用）

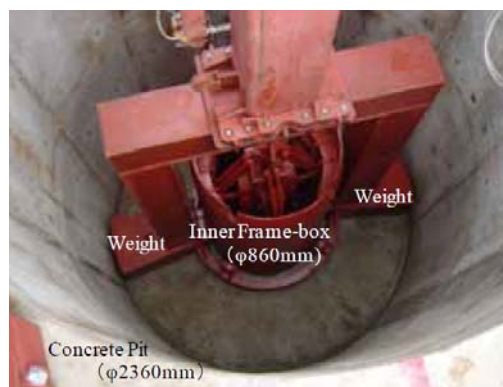


図 2.4-6 重錘落下による緩衝材の締固め（文献9）より引用）

(3) 縦置き／吹付け方式

緩衝材の材料であるベントナイトと砂に適切な水分を与え、吹付けコンクリートと同様な手法で所定位置に吹き付けることで緩衝材を構築する方法である。縦置き方式を対象に開発を行ったが、手法としては横置き方式にも対応可能である。図 2.4-7 は縦置き方式の緩衝材の施工を想定して、吹付け施工実験を行っている様子である。高密度な緩衝材の構築は難しいと考えられていたが、縦置き方式において、リファレンスである乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ であれば実現可能であることが明らかになっている。



図 2.4-7 緩衝材の吹付け施工(文献 9)より引用)

(4) 横置き／ペレット充てん方式

前述したように、分割ブロック定置方式および原位置締固め方式は、縦置き方式を対象として施工技術の研究開発が行われた。これらの方法を横置き方式に適用することは難易度が高い。分割ブロック定置方式では、ブロックを製作することに定置方向は無関係であるが、定置方向が異なれば定置技術の難易度が格段に高まる。また、原位置締固め方式においては、締固めエネルギーを与える方向を横にしなければ、自由落下方式などは適用できないため、新たな方式を検討する必要がある。このため、横置き定置方式に縦置き定置方式を対象に開発された技術をそのまま適用することは無理があり、実現性が高そうな緩衝材施工方法としてペレット充てん方式の検討が行われた。

ペレット充てん方式では、粉体のベントナイトを締固めるのではなく、ペレットを所定の位置に充てんすることで緩衝材を構築する。ペレットとして粉体に加工する前のベントナイト原鉱石の破砕材が考えられた。緩衝材のリファレンス仕様が表 2.2-1 に示したように乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ なので、ベントナイトのみで構成されるペレットで緩衝材と同等の性能を担保することを考えると、充てん密度 $1.37\text{Mg}/\text{m}^3$ が目標値となる。スクリーコンベアを充てん装置として用いて、実寸規模の充てん実験が実施された結果、充てん密度 $1.3\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度で施工できることが明らかにされている¹⁰⁾。緩衝材の仕様が $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 以下と低密度側に変更になった場合には適用可能となる可能性は残っているが、現時点では緩衝材の施工技術としては適用性がないと考えられる。

(5) 横置き／PEM方式

PEM方式は、人工バリアの構築のすべてを、あらかじめ地上で行う方式である。横置き方式での緩衝材構築技術の確立が困難であるとの認識から、代替案として注目されている。地上作業は施工性がよく、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材を所定の仕様で、かつ所定の位置関係でパッケージ化するのに適している。パッケージ化には、金属容器が用いられることが考えられている。このような方式を用いることは、地下で施工を実施する他の方法よりも、緩衝材の施工品質である乾燥密度や形状の確保が容易である。

この方式の最も大きな課題は、すべての人工バリアを内包した PEM 容器が巨大かつ大重量であるため、それを所定の位置まで移動し、所定の位置に定置する技術の確立であった。人工バリアの仕様で決まる PEM 容器の大きさに対して、PEM を搬送するためにはこれより大きい処分抗道が必要である。十分に大きい処分抗道を用いれば重量物であっても搬送技術の選択肢が広がるが、処分抗道を大きくするほど掘削費用は増え処分事業のコストは増大する。このため、できる限り小さい処分抗道が望まれ、そのための搬送定置技術が模索された。国の基盤研究では、約 35 トンもの重量物である PEM の搬送定置技術として、エアーパーレット方式の搬送・定置技術が提案され、実証的な研究が行われた。エアーパーレットは PEM を下から支える方式であり、下方に空気を噴射することで床（抗道下部）との摩擦が低減し、PEM の実質の重量が 1/100 程度となるため、搬送が容易となる。

図 2.4-8 は、下半部を模擬した抗道にて、実寸大で実重量の PEM をエアーパーレットで搬送実験を行っている状況である¹¹⁾。

PEM の上部に搬送機器は必要なく、下部においても抗道とのすき間は 300mm 程度であり、比較的小さい処分抗道でも適用可能である。手前のワイヤーに 100～200kg 程度の引っ張り力作用させることで、約 35 トンの PEM が容易に移動できることが明らかになり、搬送技術として有効であることが示されている。

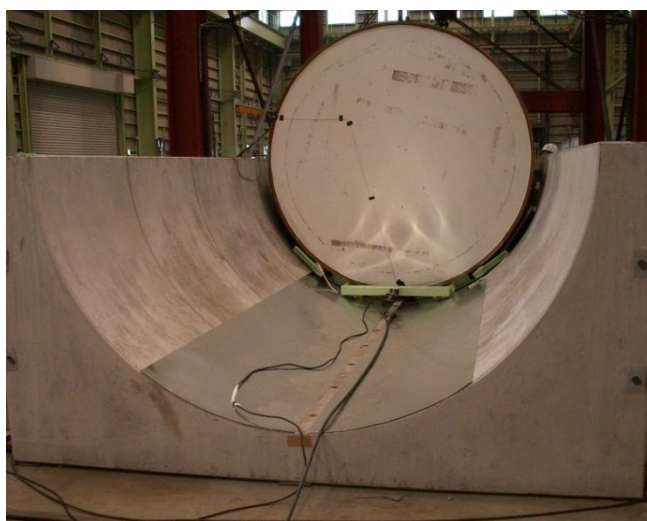


図 2.4-8 PEM 容器の搬送試験の様子（文献 11）
より引用)

2.5 緩衝材周囲のすき間とその取扱い

2.5.1 すき間の発生原因と位置

これまでに述べてきたように、緩衝材の施工方法として複数の方法が検討されており、施工法によっては緩衝材の周囲にすき間が発生する。

ベントナイトブロックを定置する施工方法では、すき間の発生は避けられない。図 2.5-1 は縦置き処分方式におけるすき間の位置を示している。緩衝材と岩盤空洞との間および緩衝材とオーバーパックとの間にすき間が生じる。

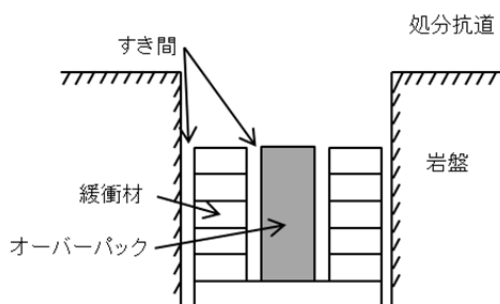


図 2.5-1 縦置き処分方式におけるすき間の概念

すき間の規模、すなわちすき間幅は適用する定置技術によって異なると考えられるが、狭いすき間への対応が可能な緩衝材を上面で把持する方式でも、すき間の発生を避けることはできない。さらに、横置き定置方式に適用する場合には、まだ十分に定置技術の検討が行われていないが、定置技術の難易度は非常に高いと考えられ、すき間の規模は縦置き方式よりも大きくなることが予想される。

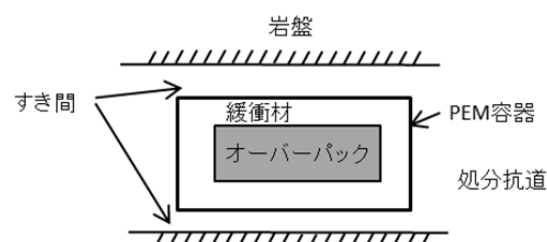


図 2.5-2 PEM 処分方式におけるすき間の概念

横置き方式の代替案として考えられている PEM 方式においても、PEM 容器の搬送のために最低限のクリアランスは必要であり、定置後には図 2.5-2 に示すように PEM 容器と岩盤空洞との間にすき間が生じる。

また、原位置締固め方式を採用しても、緩衝材周囲にすき間が残る可能性がある。前述のように研究開発が行われている、縦置き処分孔に重錘落下方式を適用する例では、オーバーパックへの締固め衝撃の影響が懸念されるため、緩衝材構築のあとにオーバーパックを挿入する方式がとられた。この場合、オーバーパックを挿入するためにクリアランスが必要であり、これがすき間として残ることになる。

2.5.2 ブロック定置方式におけるすき間の取り扱い

ベントナイトブロック定置方式では、緩衝材の周囲にすき間の発生は避けられないものの、定置技術を適切に選択することで、すき間の幅は狭くすることが可能であり、狭いすき間であれば緩衝材の自己シール性により閉塞できると考えられている¹²⁾。

図 2.5-3 は、このような考え方による緩衝材ブロックの寸法の例である。緩衝材の仕様は 70cm 幅であるが、定置する緩衝材ブロックは 64cm に設定されている。緩衝材と廃棄体とのすき間である 2cm の部分と、願商材と岩盤とのすき間である 4cm の部分は、緩衝材ブロックが膨潤することで閉塞する領域に設定されている。緩衝材が膨潤したのちに閉塞した領域を含め全域で密度が均質化することを想定すると、最終的に緩衝材部分の密度が 1.6Mg/m^3 となるためには、約 1.8Mg/m^3 の緩衝材ブロックを用いる必要がある。

しかし、乾燥密度が 1.8Mg/m^3 の緩衝材ブロックは製造可能あることが確かめられているが、これ以上の密度の緩衝材ブロックを製造するためには、さらに大きな載荷力が必要となり課題もある。緩衝材ブロックを定置するために、より広いすき間幅が必要とされた場合には、膨潤によりすき間を閉塞する考え方では対応できないことも考えられる。

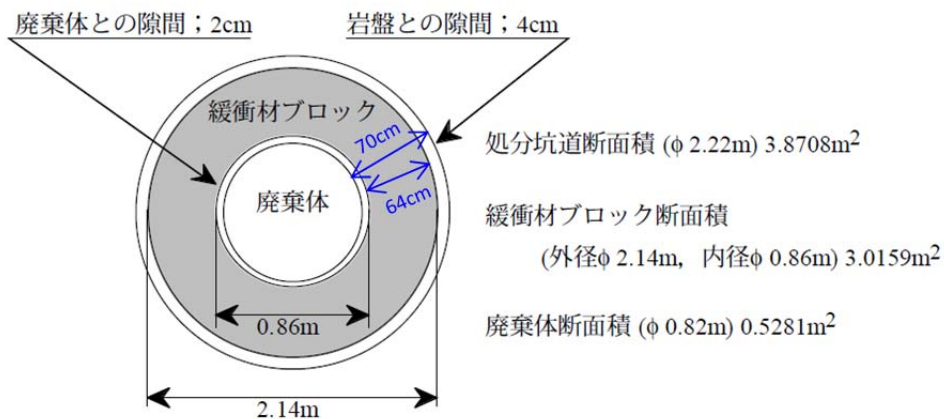


図 2.5-3 緩衝材周囲のすき間の設定 (文献 12) に加筆)

2.5.3 すき間充てんの現状

緩衝材周囲に発生するすき間は、緩衝材の膨潤で閉塞するように考える一方で、適切に処理する必要があることも示唆されている。JAEA の 2 次とりまとめでは、処理の方法として表 2.5-1 に示すように 3 種類が挙げられている。緩衝材と同じ材料であるベントナイ

トが、充てん材料として考えられており、緩衝材が膨潤ですき間を閉塞する機能を補助する役割を期待していると考えられる。しかし、どの方法についても技術的な裏付けは示されておらず、成立性の確認や適切な施工方法の確立が望まれる。

表 2.5-1 すき間の処理方法の例（文献 12）より作成

方式	説明
ベントナイトペレット充てん方式	高密度で製作したベントナイトペレットをすき間に充てんする。
粉末ベントナイト噴射方式	粉末ベントナイトをポンプにより噴射して、すき間に充てんする。
ベントナイトスラリー投入方式	高含水比のベントナイトスラリーをすき間に充てんする。

一方、高尾らは、すき間をそのままにしておくと廃棄体が発する熱の放出が妨げられ、緩衝材の温度が上昇し鉱物の熱変質等によって性能が低下する懸念を指摘したうえで、すき間充てんの必要性を示し、すき間充てん実験を行っている¹³⁾。充てん材料および充てん方法についての検討は、実施例が皆無であることも指摘している。ここでは、充てん材料として、ケイ砂や粒状のベントナイトが使用されている。また、充てん工法として施工の容易性の観点で、自由落下による方法を選択し、充てん試験を行っている。その結果によると、粒状のベントナイトを使用した場合、粉体を用いるよりも充てん密度を高められることを示している。

2.6 ベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術の必要性

緩衝材周囲に発生するすき間については、これまでに踏み込んだ議論がされておらず、そのため充てん技術に関する研究も少なかった。

すき間はそのままの状態にしておくと、地下水の通りみちとなり、施設全体のバリア機能に悪影響を与える恐れがあると考えられる。すき間が狭ければ、緩衝材の膨潤によってやがて閉塞されると考えることは疑問の余地はないが、閉塞までの時間については把握されておらず、その期間にベントナイトが流亡することも考えられ、緩衝材が期待される機

能を発揮しなくなる可能性もある。膨潤により閉塞できないほどのすき間であれば、事前に何らかの方法により充てんすることは必要である。

すき間充てんの材料としては、空間を埋めるだけであれば、セメント系材料、土質系材料などの使用も想定される。しかし、セメント系材料は、超長期にわたって品質を維持しなければならない高レベル放射性廃棄物処分において、品質の維持期間が保証できない恐れも指摘されている。また、セメント材料から溶出するカルシウムイオンがベントナイトを変質させる懸念もある。一方、一般的な土質材料では、地下水の通りみちとなることを防ぐほどの低透水性の確保に関しては疑問が残る。これらに対して、緩衝材と同じ材料であるベントナイト系材料を用いれば、このような問題を解決できる可能性が高く、十分な密度に埋め戻すことができれば、低透水性を確保できると考えられる。

すき間の施工方法として緩衝材と同様の方法を用いることは、すき間が狭いため難しいと考えられる。狭隘な地下空間での施工性を考慮すると、自由落下などの簡易な施工法を適用することが現実的である。そのためには粉体のベントナイトではなく粒状体のベントナイトを用いるのが有効である。高尾らは、粒状体であるベントナイト原鉱石の破砕品で、自由落下による中規模な充てん実験を行って、充てん密度 1.3Mg/m^3 程度を取得しており、これは粉体ベントナイトを用いるよりも高い¹³⁾。しかし、充てん方法などの充てん技術に関する検討はこれまで行われておらず、実際のすき間を想定した規模での実証実験も実施されていないのが現状である。

ベントナイトを用いた場合のすき間充てん技術の開発上の目標として、緩衝材と同等の性能を発揮できる密度に施工できれば、非常に有益な技術と考えられる。すき間部の透水係数や膨潤性能が緩衝材と同等であれば、すき間部が水みちになる可能性は低く、緩衝材が膨潤によって密度低下することを抑制できる。緩衝材のリファレンス仕様は、2.2 節に述べたように、砂を 30% 配合したベントナイトを 1.6Mg/m^3 の乾燥密度とすることであるので、有効粘土密度に換算すれば 1.37Mg/m^3 である。これは砂を配合しないでベントナイトのみを材料として用いるとすれば、乾燥密度で 1.37Mg/m^3 の充てん密度が確保できれば目標を達成することとなる。

ベントナイトペレット、すなわち粉体のベントナイトから加工した粒状体は、原鉱石破砕材料より高い単体密度が期待できる。単体密度が高いベントナイトペレットは、充てん密度の高いすき間充てんを行うために有利である。また、ベントナイトペレットの形状や粒径なども充てん密度に影響を与えると考えられる。ベントナイトペレットの製造方法は

様々あるが、実際に製造されたベントナイトペレットですき間充てん技術が検討された例は少ない。小規模な充てん実験が行われている程度であり、目標とされる充てん密度 1.37Mg/m^3 の実現には至っていない。

本研究では、緩衝材周囲に発生するすき間はベントナイトペレット用いて 1.37Mg/m^3 以上の充てん密度で充てんすることが必要と考え、それを実現するために充てんに適したベントナイトペレットの製造方法や、そのベントナイトペレットを用いた充てん技術を確立することが重要と考えた。

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—総論レポート, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) 小林紘治, 伊藤雅和：最近のベントナイトの製造工程について, 粘土科学, Vol.31, pp.222-230, 1992.
- 3) 鬼形正伸：ベントナイトの特性とその応用, 粘土科学, 粘土科学, 第46巻, 第2号, pp.131-138, 2007.
- 4) Nakashima H., Ishii, T., Nakahata A., Tanabe H., and Tanuma, S. : Swelling deformation of compacted bentonite/sand mixture. Clay Science for Engineering, pp.537-542, Adachi & Fukue (eds) 2001 Bulkema, Rotterdam, 2001.
- 5) 小峯秀雄：高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋め戻し材の膨潤評価式の提案—砂とベントナイトの配合割合およびベントナイト中の陽イオンの種類・組成の影響—, 電中研報告 U99013, 平成11年10月, 1999.
- 6) (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的设计, 品質管理および検査の考え方, 2009年7月, 2009.
- 7) 原子力発電環境整備機構:地層処分事業の安全確保 (2010年度版)—確かな技術による安全な地層処分の実現のために—, 原子力発電環境整備機構, NUMO-TR-11-01, 2010.

- 8) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度 地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書 (3/3), 2006.
- 9) Nakashima H., Asano, H. and Kawamura, H. : Design options for HLW repository operation technology:Part I- Demonstration and evaluation of remote handling technologies. Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Volume 2, ICEM2010-40242, pp. 459-465, 2010.
- 10) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 16 年度 地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書 (2/2), 2005.
- 11) 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊) -遠隔操作技術高度化開発-, 2012.
- 12) 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 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 13) 高尾肇, 増田良一, 上坂文哉, 竹ヶ原竜大, 雨宮清, 千々松正和：ベントナイトペレットの特性試験 (その 1) -ベントナイトペレットの製作方法の検討および製作-, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.473-474, 2002.

第3章 乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法

3.1 はじめに

本章では、新たなベントナイトペレットの製造方法について論じた。既存の粉体加工装置を利用して球形なベントナイトペレットを製造し、それを乾燥収縮を利用して高密度化する方法である。この製造方法が他の方法と大きく異なるのは、ペレットの密度を高めるために圧縮力ではなく、乾燥収縮を利用することである。乾燥収縮を利用することで 2.0Mg/m^3 と比較的高密度なベントナイトペレットが製造可能であることを明らかにした。

3.2 節で、既存のベントナイトペレット製造方法を整理し、それによって製造されるベントナイトペレットの特徴を示した。すき間充てん材料としての利用が考えられているベントナイト原鉱石の破碎材料についても言及し、その粒子の乾燥密度が 1.8Mg/m^3 程度であることも示した。

3.3 節では、新たなベントナイトペレット製造方法の製造手順や製造条件などを示した。製造されるベントナイトペレットの特徴を、既存の製造方法と比較して示した。製造条件の設定の根拠となる実験的検討については、次の節に示した。

3.4 節では、製造条件の設定に関連する造粒実験について述べた。また、3.5 節では乾燥条件の設定に関連する乾燥実験について述べた。

3.2 既存のベントナイトペレット製造技術と製造されるベントナイトペレットの特徴

粉体のベントナイトからペレットを製造する方法にはさまざまな方法が考えられる。一般的な粉体加工技術もあれば、放射性廃棄物分野で研究開発の段階にあるものまで幅広い。しかし、ベントナイトペレットの製造実績が報告されている方法は少なく、製造方法が詳述されているものは、さらに少ない。

ここでは、ベントナイトペレットの製造技術と、既存技術により試作されたベントナイトペレットの特徴について概括する。なお、ベントナイトの種類についてはクニゲル V1® (クニミネ工業製) を中心に整理した。ベントナイトの種類が異なると同じ製造方法でもペレットの密度などが異なると考えられるためである。クニゲル V 1 は我が国の代表的な Na ベントナイトであり、放射性廃棄物分野で最も研究データが多いベントナイトである。

3.2.1 ベントナイト原鉱石を破碎する方法

ベントナイト原鉱石の破碎材は最も簡易に製造できるベントナイト粒状体である。市販されているベントナイトの最終工程はミルによる粉末化であり、その前のベントナイトの状態はベントナイト原鉱石を破碎した粒状体であるため、製造コストも安いと考えられる。最近では粉体であるクニゲル V1 と同じ原鉱石から製造された粒状品も市販されている。例えば、図 3.2-1 に示す 10mm アンダー品のクニゲル GX (クニミネ工業製) や図 3.2-2 に示す 30mm アンダー品の OK ベントナイト (クニミネ工業製) などである。

クニゲル GX は低レベル放射性廃棄物の処分において低透水層としての利用を想定した検討が進められており、締固めにより乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度の施工が可能であることが示されている¹⁾。クニゲル GX の粒度分布は伊

藤らが報告しているように、最大粒径 10mm から最小粒径およそ 0.07mm の間に緩やかに分布している²⁾。締固め施工をする場合には、粒径分布の違いが仕上がりの乾燥密度に影響することを雨宮らが示しており、最大粒径を大きくし粒径分布の幅が広くなれば締固め密度が高くなる³⁾。自由落下でも同様のことが言えるとすると、原鉱石破碎品の充てん性がある程度高いのは、大小さまざまな粒径の粒が混在していることによると考えられる。

ところで、粒状体そのものの密度に関しては報告されている例はない。筆者らは、OK ベントナイトの中から比較的大きい 20~30mm 程度の塊を選び密度を求めた。測定は水中懸垂法、すなわち網に乗せた状態で塊を水中に沈め、浮力より塊の体積を求め、塊の質量をこの体積で除して密度を計算する方法で行った。水浸時には気泡を巻き込まないように注意した。その結果、含水比 8.7%の状態での乾燥密度 $1.81\sim 1.84\text{ Mg}/\text{m}^3$ であった。クニゲル GX に含まれる 20mm 以下の粒子は、破碎工程で生じた微小亀裂を内在していることも考えられるので、これよりも小さい密度になっていることも推察できる。



図 3.2-1 原鉱石破碎材料 (クニミネ工業製クニゲル GX®)

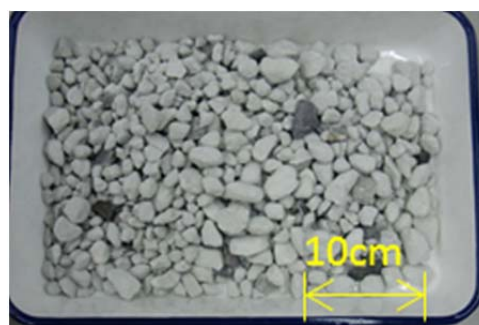


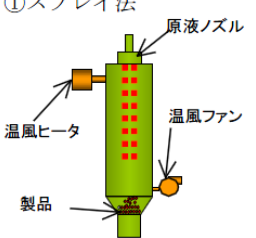
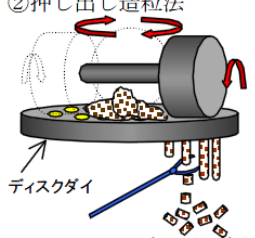
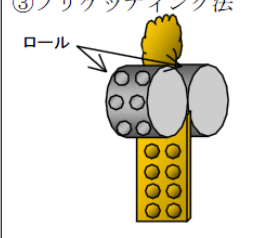
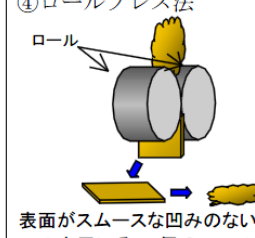
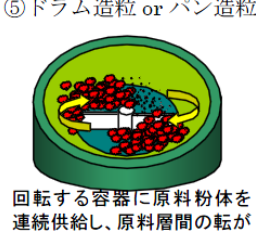
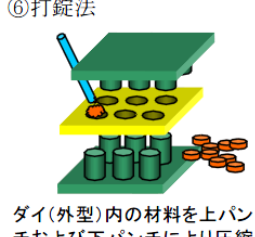
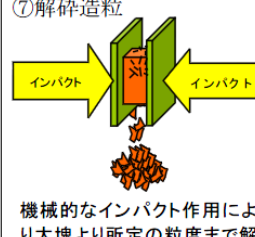
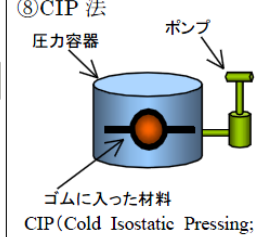
図 3.2-2 原鉱石破碎材料 (クニミネ工業製 OK ベントナイト®)

3.2.2 粉体ベントナイトからペレットを製造する方法

原鉱石破砕品よりも高い密度のベントナイトペレットを製造する試みがある。高尾らは文献調査や粉体加工機メーカーへのヒアリングを行い、粉体からベントナイトペレットを製造する方法について調査し、表 3.2-1 に示すようにまとめている⁴⁾。そのうえで、密度が高いベントナイトペレットが製造できる可能性が高い方法として、押し出し造粒法、ブリACKETING法、ロールプレス法、打錠法、解砕造粒法、CIP法の6種類を示している。

この中のいくつかの方法については、他の文献などにベントナイトペレットが試作された例が報告されているので、以下に代表的な知見を整理する。なお一部は筆者らによる製造例も含む。

表 3.2-1 様々なベントナイトペレット製造方法（文献4）より引用）

<p>①スプレイ法</p>  <p>原液ノズル 温風ヒータ 温風ファン 製品</p> <p>スラリー状原料を乾燥室内に噴霧し、乾燥させると同時に液滴の表面張力により顆粒を得る方法</p>	<p>②押し出し造粒法</p>  <p>ディスクダイ</p> <p>ローラーによりディスクダイの孔から粘ちゅう原料を押し出し、所定の長さの円柱状のペレットを得る。これを乾燥させ、粒状製品を得る方法。</p>	<p>③ブリACKETING法</p>  <p>ロール</p> <p>2対の凹みのあるロールを密着回転させ、このロール圧により粉体を圧縮成型する方法</p>	<p>④ロールプレス法</p>  <p>ロール</p> <p>表面がスムーズな凹みのないロールを用いる。2個のロールを相対的に回転させ、ロール間の圧力で粉体を密度の高い強固な板状(フレーク)に成形したのち、フレークを解砕する方法</p>
<p>⑤ドラム造粒 or パン造粒</p>  <p>回転する容器に原料粉体を連続供給し、原料層間の転がり転動により粒体を成長させる方法</p>	<p>⑥打錠法</p>  <p>ダイ(外型)内の材料を上パンチおよび下パンチにより圧縮成型する方法</p>	<p>⑦解砕造粒</p>  <p>インパクト</p> <p>機械的なインパクト作用により大塊より所定の粒度まで解砕して、粒状製品を得る方法</p>	<p>⑧CIP法</p>  <p>圧力容器 ポンプ</p> <p>ゴムに入った材料 CIP(Cold Isostatic Pressing: 等方圧加圧法)により、圧縮成型する方法</p>

(1) 市販の粉体加工機の利用

市販の造粒装置が利用できればベントナイトペレットの製造コストを抑えることができる。ブリACKETING法や打錠法は汎用の装置が流通しており、粉体加工の分野でさまざまな材料に対して使われている。ブリACKETING法は、2つの凹みのあるロールを密着して回転させることで、ロール圧を利用して、その凹みの中に粉体を圧縮成型する方法である。打錠法は円筒シリンダー内に充てんした粉体を、凹部を有するピストンで上下から一

軸圧縮して錠剤を製造する方法である。なお、どちらの方法も圧力を加えることでペレットを製造する方法であり、装置は連続生産ができる構造となっている。

図 3.2-3 および図 3.2-4 は2つの方法で製造されたベントナイトペレットの例である。ブリケッティング法の例は、海外で止水材として販売されている市販品である。原材料はクニゲル V1 ではない。一方、打錠法の例は筆者らが打錠機を用いてクニゲル V1 のペレットを製造したものある。形状に着目すると、どちらも扁平であり、大きさが単一径であることがわかる。

ベントナイトペレット自体の密度については、クニゲル V1 で製造されたペレットについての報告例がある。打錠法については杉田・千々松ら^{5),6)}が乾燥密度 1.91Mg/m^3 を報告している、ブリケッティング法については乾燥密度 1.77Mg/m^3 の報告例がある⁷⁾。密度は原鉱石よりも高いが、実際に空間に充てんした場合は、形状等の影響で充てん率が低くなり、充てん密度が高まらないことも考えられる。そのような場合には粒径の異なるベントナイトペレットを混合するなどの対応が考えられるが、粒径の異なるペレットを製造するためには、ブリケッティング法では凹みの形状や大きさを変えたローラ、打錠法では異なる径のピストンなどが必要となり、装置の改良もしくは複数台の装置を用意するなどの煩雑さがともなうと考えられる。

(2) 一軸圧縮で高密度ペレットを作製する方法

高い載荷圧でベントナイトペレットを成形できれば、載荷圧に応じて密度の高いベントナイトペレットが作製できる。加える圧力と成形密度との関係は、クニゲル V1 において鈴木らが取得しているデータが参考になる⁸⁾。 $\phi 50\text{mm}$ の圧縮ロッドで試料を円柱形に静的圧縮する方法で必要な圧力は、乾燥密度 1.86Mg/m^3 の場合 20MPa 、 1.95Mg/m^3 では 50MPa 、



図 3.2-3 ブリケッティング法で製造されたベントナイトペレット



図 3.2-4 打錠法で製造されたベントナイトペレット

2.03 Mg/m³では 100MPa である。目標とする密度に応じて指数的に大きな載荷圧力が必要となることがわかる。

図 3.2-5 は、著者らが一軸圧縮により作製したクニゲル V1 のベントナイトペレットである。直径 20mm の円筒ピストンを用いた。圧縮には市販の手動油圧ジャッキを用いており、最大載荷荷重は 40kN 程度であった。含水比 7.8% で作製したペレットの乾燥密度は 2.00~2.04Mg/m³ であった。載荷力を載荷圧に換算すると 127MPa 程度であり、鈴木らのデータとほぼ整合する。



図 3.2-5 一軸圧縮により製造したベントナイトペレット

上記の試作例は、比較的密度が高いベントナイトペレットが、簡易な方法により作製できることを示したもので、すき間充てん材としては改良すべき点も多い。端部が平面のピストンを用いたので形状は円柱形であり、充てん性が高くないことも考えられる。高圧力の一軸圧縮で端部が曲面もしくは球形のペレットを作製することには、さらなる工夫が必要であり、まだ報告された例はない。また製造コストの観点からは、ある程度の製造スピードが確保できるような装置の開発が必要となる。

(3) 等方圧力で球形ペレットを製造する方法

圧縮成型を一軸圧縮で行う限り、球形に近いペレットを製造することには課題が多い。和田らは、冷間等方圧加圧処理 (CIP : cold isostatic pressing) により、高密度で球形のベントナイトペレットを製作している。最大 600MPa の等方圧を作用させ、乾燥密度 2.25Mg/m³ のペレットを製造したことが報告されている^{9),10),11)}。

しかし、製造方法の詳細は示されておらず、高圧を作用できる装置が大規模であったり、製造コストが高いことも懸念される。また、和田らが示している試作例では、50mm、20mm、2mm の粒径のみが紹介されているが、それ以外の粒径のペレットの製造可能性については情報が不足している。

3.2.3 既存のベントナイトペレット製造法のまとめ

ここまでに述べたように、ベントナイト原鉱石の破砕品は粒そのものの密度は 1.8Mg/m³ 程度とそれほど高くなく、一方、粉体のベントナイトからペレットを製造すれば、原鉱石

破砕品より密度が高いベントナイトペレットが製造できる。製造方法としてさまざまな方法が考えられるが、ほとんどの方法は圧縮力で密度を高める方法であり、ペレットの密度は圧縮力の大きさに依存する。しかし、すき間充てん材としての利用を前提に、ペレットの密度だけでなく、形状や製造の容易さなどを考慮すると、これまでに製造実績があるベントナイトペレットの製造法には一長一短があると考えられる。

3.3 乾燥収縮を利用した新たなベントナイトペレットの製造法

既存の製造方法とは異なる新たな考え方のベントナイトペレット製造方法^{12),13),14)}を考えた。これは、圧縮力でなく乾燥収縮を利用する方法で、乾燥密度が 2.0Mg/m^3 と比較的高密度なベントナイトペレットが製造できる。既存の製造方法と比較しながら、新たな製造方法や製造されるベントナイトペレットの特徴を 3.3.1 項で説明したうえで、3.3.2 項にて製造方法の詳細を示す。

3.3.1 製造法の特徴とペレットの特徴

本方法により製造されるベントナイトペレットの特徴は、以下に示すように大きく3つである。

- (1) 球形
- (2) 高密度
- (3) 単粒径で、かつ任意の粒径

1つ目の特徴は、ペレットの形状が球形であることである。一軸圧縮でペレットを成形すると、球形に近いペレットを製造することは難しい。ペレットの形状は型枠やピストンの形状などで規定されるので、円筒形や扁平な形状となるのが一般的である。本方法では、圧縮成型でペレットを製造する場合と比べて多くの水分をベントナイトに与え、可塑性のある状態でペレットを成形する。可塑性があるため球形に形を整えることが容易である。

2つ目の特徴は、ペレットの密度が 2.0Mg/m^3 と比較的高いことである。これまでの方法では密度の高いペレットを製造するには、それに応じた圧縮圧力が必要である。CIP 法では乾燥密度 2.25Mg/m^3 の製造実績が示されているが、一軸圧縮の原理を用いる既存の粉体加工装置を用いた場合では乾燥密度が 1.9Mg/m^3 程度である。これに対して、本方法では高

密度化を圧縮圧力に頼るのではなく、乾燥収縮を利用する。可塑性がある状態で球形に成形したベントナイトペレットは、水分量が多いため乾燥密度が 1.5Mg/m^3 程度と考えられるが、適切に乾燥させると 2.0Mg/m^3 程度のベントナイトペレットが製造できる。なお、ペレットが球形であることも乾燥収縮によい影響を及ぼしていると考えられる。

3つ目の特徴は、単粒径のペレットであり、かつ容易に粒径が異なるペレットを製造できることである。この特徴は、本製造方法で使用する汎用的な造粒装置の機構に依存している。詳細については後述する。すき間の種類や形状によりさまざまな粒径のペレットが必要になった場合などに対応しやすい。また、充てん密度を高めるために異なる粒径のペレットを混合して用いる場合などにも対応しやすい。

3.3.2 製造手順

製造手順を図 3.3-1 に示す。四角の枠は作業および工程を示し、角の丸い四角の枠は製品の形態の変遷を示す。手順は造粒工程と乾燥工程とに大別できる。造粒工程はさらに、加水・混練、押出し造粒、転動造粒の3つの異なる工程に分けられ、それぞれ異なる汎用的な装置を用いる。

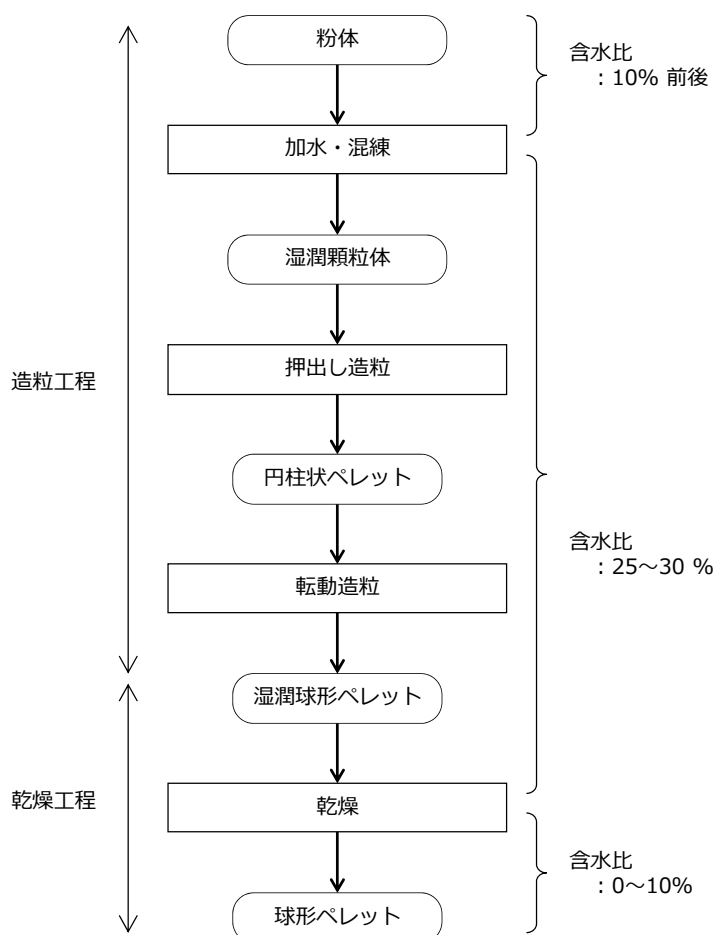


図 3.3-1 ベントナイトペレットの製造手順

(1) 加水・混練（造粒工程）

造粒工程では最初に加水・混練を行う。粉体の材料に所定の水分を加え、それを均一に混練する。水分量の調整は造粒にとって重要である。混練後の水分状態が適切でないと、押し出し造粒および転動造粒に支障があり、転動造粒後の湿潤ペレットが球形にならない。問題点の具体的な内容については後述するが、ベントナイトとして国産の代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1（クニミネ工業製）を用いた場合、3.4 節で後述するように造粒が可能な含水比が 25～30% の範囲にある。これは塑性限界より少し高い水分量である。クニゲル V1 の自然含水比は通常 10% 前後であるので、乾燥などの事前処理は必要なく、加水することで水分調整ができる。

(2) 押し出し造粒（造粒工程）

押し出し造粒は、加水・混練したベントナイトから円柱状のペレットを作る工程である。ダイスと呼ばれる円形の孔が開いた金属板に水分調整した材料を通過させ、円柱状の造粒品を成形する。図 3.3-2 に示すようにダイスの直上に投入された材料は、

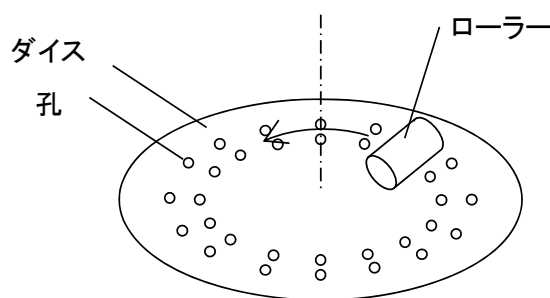


図 3.3-2 押し出し造粒の概念

ダイスの上を転がるローラで押しつぶされ、空気が抜かれ密度が上昇する。またダイスに設けられた円形孔を通過するとき材料はさらに圧縮され、円柱状のペレットがダイスの下部から押し出される。

材料の水分量が適切でないと押し出し造粒に支障がでる。水分が少ないと孔が詰まり、材料は孔を通過することができない。逆に水分が多すぎると押し出された材料が形を留めなかったり、円柱状ペレットがお互にくっつくなどの不具合が起きる。

孔の大きさが異なるダイスを用いると、さまざまな太さの円柱状ペレットを製造することができる。円柱状ペレットの太さが異なれば、後続の転動造粒後の球形ペレットの粒径が異なる。ダイスの交換は容易にできるので、一軸圧縮などによる他の製造方法と比べて、粒径の異なるベントナイトペレットを製造することに向いている。図 3.3-3 は、それぞれ押し出し径 8mm と 3mm のダイスの例である。孔はローラが材料を押しつぶす位置に円周上に配置されている。また、円柱状ペレットの長さは、ダイスの下部に備わっている回転カッターにより一定の長さに整えられる。



図 3.3-3 ダイスの例 (左 : 8mm 径、右 : 3mm 径)

図 3.3-4 は押し出し径 8mm のダイスで製造した円柱状ペレットの例である。なお、一般的な粉体をペレット化するには、この工程で製造した円柱状ペレットを乾燥し、最終製品とすることもあるが、本方法では押し出した円柱状ペレットを、そのままの形状で乾燥させるのではなく、さらに転動造粒することで球形ペレットに変える。



図 3.3-4 押し出し造粒後の円筒形ペレット (8mm ダイスの例)

(3) 転動造粒 (造粒工程)

転動造粒では、円柱状ペレットを球形ペレットに成形する。転動造粒機は図 3.3-5 のような構造である。側部が金属壁で覆われており、底部の回転円盤が高速回転する。円柱状ペレットを高速に回転する円盤上に投入すると、ペレットは遠心力で外側に飛ばされ周囲の壁面に衝突する。この壁面への衝突とペレット同士の摩擦などの複雑な挙動により次第に角が丸くなり球形になる。円盤の回転速度は、およそ 100~1000rpm の範囲で調整する。

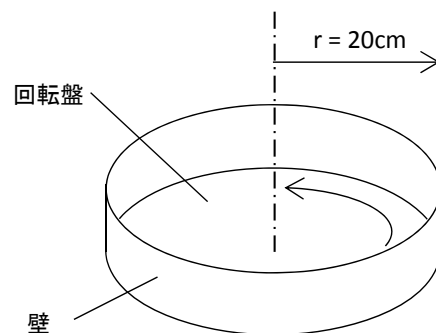


図 3.3-5 転動造粒の概念

円柱状ペレットの水分量は転動造粒により成形される球形ペレットの球形度に影響を与える。水分が少ないと可塑性が低いと、角の丸い円柱状のままになり、球形にならない。図 3.3-6 は、押し出し径 8mm で製造した円柱状ペレットが良好に球形化された例である。



図 3.3-6 転動造粒後の球形ペレット

(4) 乾燥工程

乾燥工程では、造粒工程で製造した球形ペレットを乾燥させる。このとき良好な乾燥収縮がおきれば、ペレットの乾燥密度は増加する。乾燥状態を制御して良好な乾燥収縮を起こすためには、後述するように、ゆっくり乾燥させることが有効であることが明らかになった。つまり、乾燥工程はベントナイトペレットの製造において重要な役割を果たす。

造粒後の球形ペレットは、ベントナイト原鉱石や既存のペレット製造法に比べて密度が低い。これは造粒時に比較的多くの水分を必要とするためである。水分が少ないと押し出しができなかったり、押し出しができて転動時に球形に成形できなかったりする。球形に成形するためには、ある程度の可塑性が必要となるためである。

図 3.3-7 はクニゲル V1 のゼロ空隙曲線と等含水比線を示している。後述するように造粒に必要な含水比は 25~30%程度である。造粒後の球形ペレットは表面色が黒色を示しており、カッターナイフなどで 2 つ割りにして内部を観察しても表面と同様な状態であり、飽和度は 100%に近い状態と考えられる。このような点を考慮すれば、造粒後のペレットの状態は図中 A の状態であると考えられ、乾燥密度は $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度と推察される。参考までに圧縮成型で、粉体ベントナイトから乾燥密度 $2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度のベントナイトペレットを製造する場合には含水比 10%程度に調整

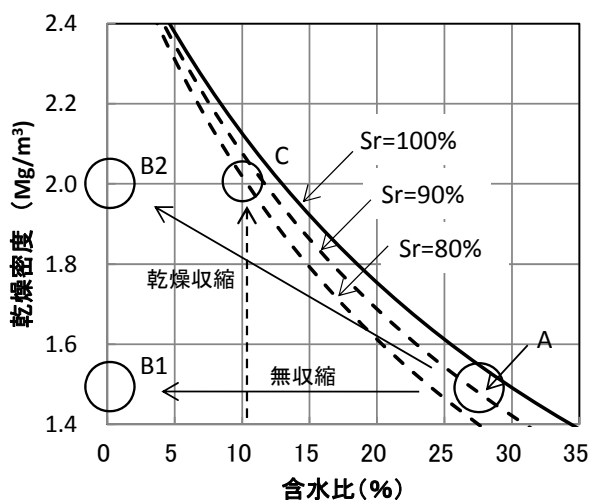


図 3.3-7 乾燥前後のベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の関係

したベントナイトを使用し、同図に示した破線矢印の経路で C に変化させていることになる。

図 3.3-8 は乾燥前後のペレットの状態図を示している。このうち、図 3.3-8 (a) は乾燥前すなわち造粒後のペレットの状態を示している。ここでは空気相はなく空隙はすべて水で満たされている飽和状態と仮定した。乾燥密度はペレット内のベントナイトの質量をペレット体積で除した値で表される。

図 3.3-8 (b1)および図 3.3-8 (b2)は乾燥後のペレットの状態である。乾燥時に乾燥収縮がまったく起こらない場合は、図 3.3-8 (b1)に示すように水が占めていた空間(V_w)が空気が占める空間(V_a)になって全体の体積が変わらず、乾燥による乾燥密度の増加は起こらない。一方、乾燥時に乾燥収縮が起きると、図 3.3-8 (b2)に示すように、水が占めていた空間(V_w)よりも空気が占める空間(V_a)が少なくなり、乾燥密度が増加する。このような乾燥後の 2 つの状態を図 3.3-7 に示すと、B1、B2 で示した○のようになる。

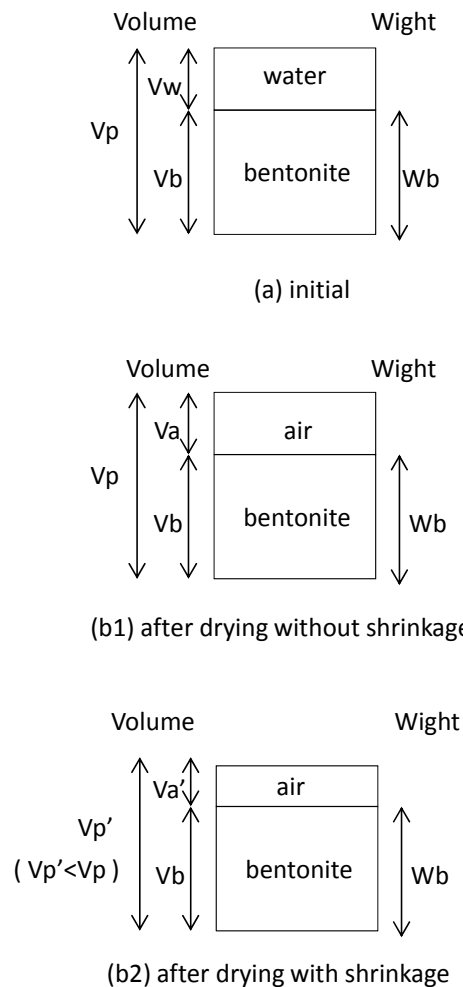


図 3.3-8 乾燥前後のベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の状態

3.4 造粒実験と造粒時水分の影響（造粒実験）

3.3.2 項で詳述したとおり、造粒工程では水分調整した粉体を押し出し造粒で円柱状に成形し、さらに可塑性を利用して球形に形を整える。このときの適切な水分量は材料により異なり、材料ごとに確認する必要がある。

これまでも農薬や肥料のペレットを製造するときには、ベントナイトが用いられる場

合はあった。しかし、これは混合材として利用しているのもであって、ベントナイトのみがペレットの材料となっていたわけではない。粉体を造粒する場合には粘着性が必要なため、粘着性が高いベントナイトがバインダー（継ぎ材）として、主材に混合される。また、このような分野でペレットに加工する目的は、形状や粒径を安定させて扱いやすくすることであり、ペレットの形状として必ずしも球形にこだわる必要も少なく、円柱状であることが多い。

つまり、ベントナイトのみで球形のペレットが製造された例はなく、ベントナイトを材料としてペレットが製造できることを確認する必要があった。造粒するには材料に粘着性が必要であるが、ベントナイトのみを材料として用いると粘着性が非常に高いと考えられ、機器が正常に機能しない恐れもあった。

そこで造粒実験を行い、ベントナイトペレットが造粒可能かどうかを確認するとともに、球形に成形するために必要となる水分量を調べた。

3.4.1 実験方法と実験条件

押出し径 8mm、5mm、4mm、2mm、1mm のダイスを用いて、粒径の異なるベントナイトペレットを造粒した。すべてのケースでベントナイトにはクニゲル V1（クニミネ工業製）を用い、自然含水比状態で 5kg の材料を用いた。

造粒に用いた機器は、加水・混練には混合機（GRAL-75 型：不二パウダル社製）、押出し造粒にはディスクペレッター（F-20 型：不二パウダル社製）、転動造粒にはマルメラライザー（Q-400 型：不二パウダル社製）である。

少量のベントナイトに水を加えて固まり易さなどの状態を確認し、他の粉体材料での経験を踏まえて判断したうえで、造粒実験を行う水分条件を表 3.4-1 に示すように設定した。押出し径の違いにより加えた水の量は異なり、これを上水添加率で示した。上水添加率は、材料の湿潤重量に

表 3.4-1 造粒実験における含水比条件と造粒の成否

押出し径 (mm)	上水添加率 (%)	材料含水比 (%)	混合後含水比 (%)	造粒の可否
8	17%	10.22%	28.95%	○
5	17%	10.22%	28.95%	○
4	16%	8.04%	25.32%	×
4	18%	8.04%	27.48%	○
2	17%	8.60%	27.06%	○
1	17%	8.60%	27.06%	×
1	16%	8.60%	25.98%	○

対する加えた水の重量を比で表したもので、粉体加工分野で使われている指標である。材料の重量には自然状態で含まれている水分の重量も含むため、別途、材料含水比を電気水分計で測定し、設定した上水添加率と測定した材料含水比から混合後含水比を計算した。なお、表 3.4-1 には設定した条件での造粒実験の結果も○×で示しているが、詳しくは後述する。

3.4.2 造粒実験の結果

押出し径 8mm および 5mm のペレットは、上水添加率 17%で加水・混合した。押出し造粒では、水分が少なすぎるとダイスの孔が詰まり押出し不能になることや、水分が多すぎると転動造粒のときにペレット同士がくっつき球形に成形できなくなることなどがあるが、上水添加率 17%ではこのような問題は起こらず、良好な押出しができた。押出し造粒に要する時間は、1 ケース（自然含水比状態で 5kg）につき 3～5 分程度であった。8mm 径の場合の押出し造粒後の円柱状ペレットの状態は、先に示した図 3.3-4 のとおりである。また、転動造粒では高速円盤の回転数は 510rpm とした。4 分間の転動でペレットは円柱状から球形に変わった。さらに表面の粗度を改善するための 2 分間の転動を回転数を下げて 250rpm で行った。図 3.3-6 に示すように球形のペレットが成形された。

押出し径 4mm のペレットは上水添加率を 16%と 18%と 2 種類の水分状態で行った。16%のケースは 510rpm の転動を 5 分間継続してもペレットが円柱状から球形に変わらなかったため水分不足と判断した。18%のケースは 510rpm の転動を 6 分間行い、球形になったことを確認したのちに、250rpm の転動を 2 分間行うことで、球形のペレットが作製できた。

押出し径 2mm のペレットは上水添加率を 17%とした。4mm の場合より 1%下げたのは、押出し径が小さくなると水分が少なくても押出しやすくなること、また水分が多いと転動時にペレット表面に水分がしみだしてペレットのくっつきが起こることなどの粉体加工分野での知見を参考にしたからである。押出し後の転動造粒では、回転速度を 640rpm と 8mm～4mm の場合より高く設定した。粒径が小さくなると円盤の回転によりペレットに働く遠心力の効果が小さくなり球形になりにくくなると考えたためである。この条件にて 2mm ペレットの造粒は適正に行うことができた。

押出し径 1mm のペレットは、上水添加率 17%と 16%で造粒した。両ケースとも押出し造粒は問題なく行えたが、転動造粒では 17%のケースは水分が多すぎて、ペレット同士がペレットからしみだした水分で密着し、球形に成形することができなかった。水分が少な

い 16%は良好な造粒ができた。なお、転動時の回転数は 760rpm で 4 分間、250rpm で 1 分間の条件で行った。

3.4.3 造粒に必要な水分量

図 3.4-1 にすべてのケースの含水比をプロットする。造粒ができたケースを●で、造粒できなかったケースを×で表している。実験結果から、良好な造粒が可能な含水比が存在することが確認でき、それは 25～30%の範囲にあった。クニゲル V1 (クニミネ工業製) の水分量と可塑性の関係は、液性限界 416%、塑性限界 21%と示され

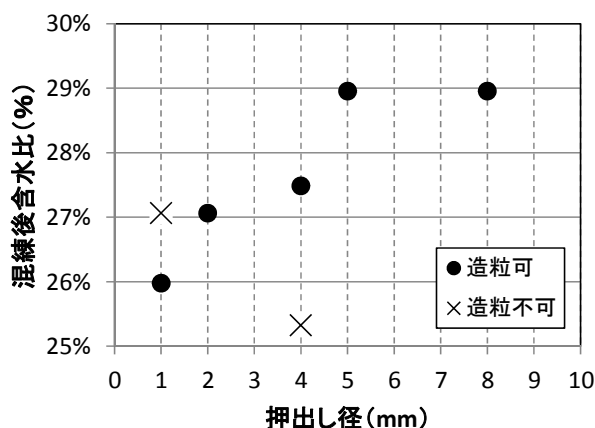


図 3.4-1 押出し径の違いによる混練時含水比

ている¹⁵⁾ことから。造粒が可能な含水比は液性限界と塑性限界の間にあり、塑性限界よりもわずかに大きい値である。すなわち、材料が塑性を示す必要があるが、その中でもより固体に近い側に適正な水分量があると考えられる。

しかし、造粒が可能な含水比の幅は 25～30%よりも狭いと考えられる。今回の実験では他の粉体での造粒経験を参考に粒径が小さくなるほど水分量を少なくして造粒実験を行った。このため、明確に造粒できない含水比が得られたのは 2 点だけである、4mm 径の場合は含水比 27.5%では造粒可能であったが、25.3%では造粒できなかった。また、1mm 径の場合は含水比 26%では造粒可能であったが、27%では造粒できなかった。ベントナイトにおいても、押出し径が大きいほど必要な水分が多く、押出し径が小さいほど水分を少なくする必要があることが推察できる。

3.5 乾燥実験と密度増加に与える乾燥条件の影響 (乾燥実験)

造粒工程で製造したベントナイトペレットは、含水比が 25%～30%程度であり、一軸圧縮でペレットを製造する方法に比べて水分量が多い。その結果、乾燥密度は 1.5Mg/m³程度となり、原鉱石破砕品の密度よりも低く、すき間充てん材としての利用には向いていない。

しかし、乾燥時に体積が収縮することで乾燥密度が向上する。乾燥収縮量や乾燥後の乾燥密度は、乾燥条件によって異なると考えられるため、造粒後の湿潤ペレットを異なる方法や温度で乾燥し、乾燥に要する時間や乾燥収縮による密度増加の違いを検討した。

3.5.1 実験条件

乾燥方法は、送風乾燥方式と炉乾燥方式の2種類とした。実験対象は、押出し径5mmと8mmで造粒した2種類の湿潤球形ペレットである。使用したベントナイトはクニゲルV1である。乾燥前の含水比は27～28%であった。表3.5-1に乾燥条件を示す。

表 3.5-1 乾燥実験における乾燥条件

乾燥方式	押出し径 (mm)	温度 (°C)	乾燥前のペレットの総重量 (g)	含水比変化グラフ
送風乾燥	8	40	1,500	図 3.5-1
送風乾燥	5	40	1,500	図 3.5-1
送風乾燥	5	50	1,500	図 3.5-1
炉乾燥	8	50	900	図 3.5-3
炉乾燥	8	110	450	図 3.5-2
炉乾燥	5	50	750	図 3.5-3
炉乾燥	5	110	700	図 3.5-2

送風乾燥方式は粉体加工分野で汎用的に用いられる乾燥方法であり、乾燥時間が短いという利点がある。底部がメッシュ製の容器に湿潤状態の球形ペレットを投入し、容器底部から上部に向けて温風を通過させる方式である。効率化の観点から水の沸点100°C前後で温度設定するのが一般的であるが、ベントナイトの場合は、この温度で送風乾燥させるとペレットに割れや欠けが多く発生することが事前にわかっていたため、40°Cもしくは50°Cの温度設定とした。温度の調整は排気温度で設定した。

炉乾燥方式には土質試験などで一般的に用いられている電気乾燥炉を用いた。炉内の底部にニクロム線があり、炉内を熱する方式である。炉内温度は炉内に設置された熱電対で計測し制御される。炉内の水分を含んだ空気は炉上部の排気口より外部空気と入れ替わる。実験では炉内温度を110°Cと50°Cに設定した。

3.5.2 乾燥実験の実験結果

(1) 含水比の変化

乾燥実験の途中段階で適宜、ペレットの全体重量を測定した。乾燥実験が終了した段階で110°Cで24時間以上の炉乾燥を行ってペレット全体の乾燥重量を求めた。この値を用い

て、乾燥途中の含水比を算定した。

図 3.5-1 に送風乾燥の場合のペレットの含水比変化を示す。1 時間～2 時間程度で含水比が 7～8%まで低下する。粒径が小さい方が、すなわち 5mm ペレットの方が 8mm ペレットよりも速く乾燥が進む。また、送風温度が高い方が速く乾燥が進むことがわかる。

図 3.5-2 に電気乾燥炉で 110℃設定にした場合のペレットの含水比変化を示す。乾燥速度は図 3.5-1 の送風乾燥に比べて、温度が高いにも関わらず遅い。含水比が 7～8%に到達するのに要した時間は 3 時間前後である。粒径の違いによる乾燥時間については、粒径の大きい 8mm ペレットの方が粒径の小さい 4mm ペレットに比べ若干速い。これは乾燥に供したペレット量が、8mm ペレットが 450g、4mm ペレットが 700g と、8mm ペレットの方が少ないためと考えられる。

図 3.5-3 に電気乾燥炉で 50℃に設定した場合のペレ

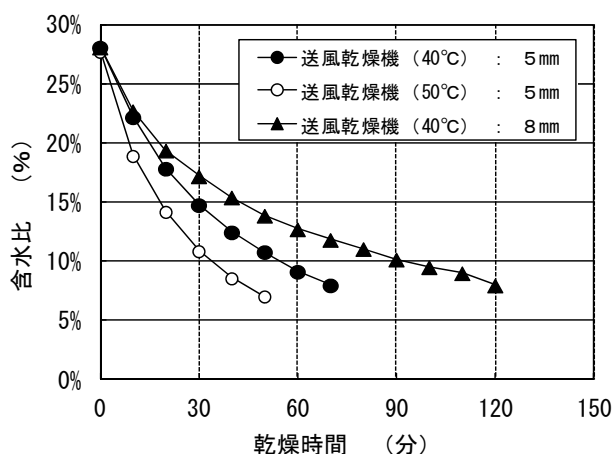


図 3.5-1 送風乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化

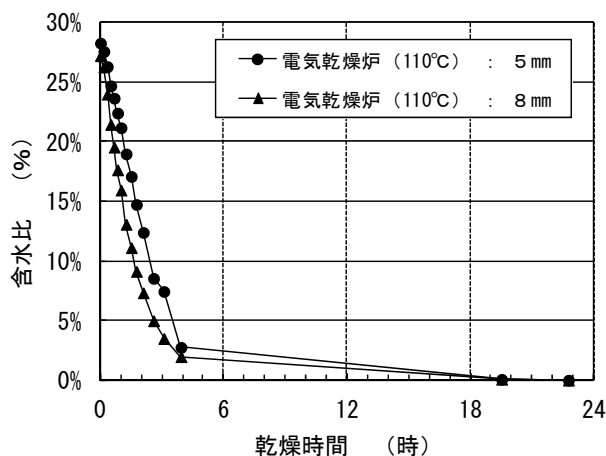


図 3.5-2 110℃炉乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化

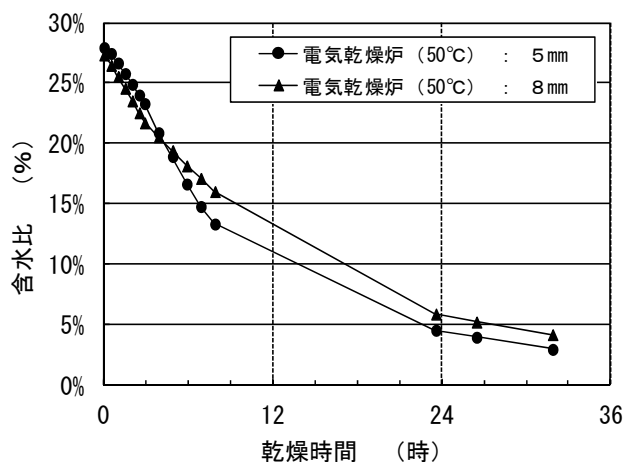


図 3.5-3 50℃炉乾燥によるベントナイトペレットの含水比変化

トの含水比変化を示す。110℃設定では4時間程度で含水比が2～3%程度まで低下するが、50℃設定では含水比が5%程度まで低下するのに1日程度を要し、乾燥温度が高い方が乾燥が速く進むことがわかる。

乾燥温度や粒径がほぼ同じである図 3.5-1 と図 3.5-3 とを比較すると、乾燥方法の違いが乾燥時間に大きく影響していることがわかる。これは乾燥時にペレットから排出された水分が含まれるペレット周囲の高湿度の空気の排出の違いによるものと思われる。送風乾燥ではペレット周囲の空気が絶えず送風によって入れ替わるが、炉乾燥では空気の入れ替えは炉上部の一部からしか行われなため、ペレット周囲が高湿度環境になっており、ペレットからの水分の蒸発が抑制されるものと考えられる。

(2) 乾燥後のペレットの乾燥密度

乾燥によるペレットの密度増加を把握するために、乾燥後のペレットに対して乾燥密度を求めた。測定には水中懸垂法を用いた。水中懸垂法は、水中に沈めたときの浮力から測定物の体積を算定する方法である。1粒のペレットではなく50g程度のペレットをまとめて測定対象とした。

なお、送風乾燥および炉乾燥50℃のペレットでは、図 3.5-1 および図 3.5-3 で示した最終状態の含水比から、さらに110℃の炉乾燥を行い、ペレットを絶乾状態にして乾燥密度を計測した。土質材料の場合、含水比が高い状態では水分の減少に伴って体積減少が起きる正規収縮を呈するが、水分が少ない状態では無収縮の挙動を示すとされており¹⁶⁾、7～8%の含水比は自然含水比以下であり、無収縮状態で密度増加がないと考えたためである。

図 3.5-4 に乾燥後のペレットの乾燥密度を示す。送風乾燥機を用いて乾燥させたペレットは乾燥密度が1.8Mg/m³程度であるが、電気乾燥炉を

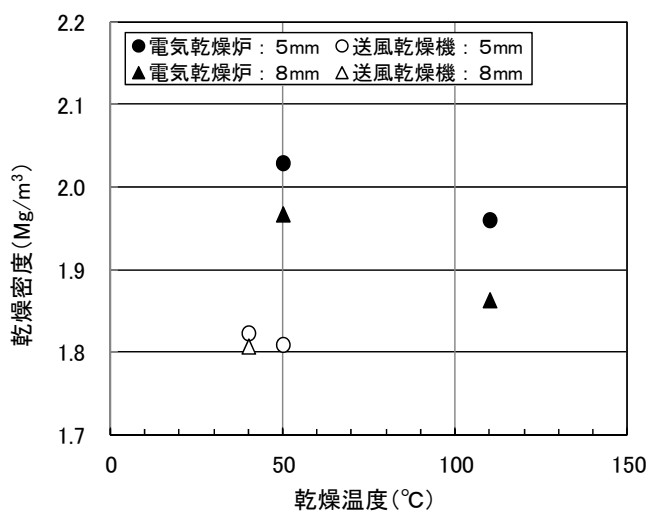


図 3.5-4 押し出し径の違いによる混練時含水比

用いた場合は 1.87~2.03 Mg/m³ と高い値を示す。また、乾燥温度が低い方が乾燥密度が高くなる傾向や、粒径が小さい方が乾燥密度が高くなる傾向がみられる。これらの要因のうち、乾燥方法の違いによる密度増加の効果がもっとも顕著であり、乾燥温度がほぼ 40~50℃ と同じであっても、送風乾燥が 1.8Mg/m³ であるのに対して、炉乾燥法では 1.96~2.03 Mg/m³ となる。

(3) 乾燥速度が密度増加に与える影響

ペレットの乾燥速度は時間当たりの含水比低下量で定義するのが適当であると考えられるが、図 3.5-1~図 3.5-3 からわかるように、乾燥速度は乾燥期間中に一定ではなく、乾燥初期に大きく、乾燥が進むにつれて小さくなる。乾燥が進み含水比が小さくなったときには無収縮挙動を示すと考えれば、まずは乾燥初期の平均的な乾燥速度が乾燥収縮に

与える影響を評価することを考えた。ベントナイトの自然含水比が 10%程度であることから、それ以下では無収縮状態であると仮定し、含水比 10%に至るまでの乾燥時間で乾燥速度を代用した。

図 3.5-5 に含水比 10%に至るまでの乾燥時間と乾燥後のペレットの乾燥密度との関係を示す。おおむね、乾燥時間が長いほど乾燥密度が高まっている。送風をせずに乾燥温度が低い場合が、乾燥密度が高くなっていることがわかる。乾燥に要する時間が長く、ゆっくり乾燥が進むほど、乾燥収縮が大きくなり結果的に乾燥密度が高まったものと推測される。

一方、乾燥に要する時間が同じでも粒径の小さいペレットの方が乾燥密度が高くなる傾向も推測される。炉乾燥 110℃の場合には、ほぼ同じ乾燥時間でも 4mm ペレットの方が乾燥密度が大きい。炉乾燥 50℃の場合には、乾燥時間が短いにもかかわらず 4mm ペレットの

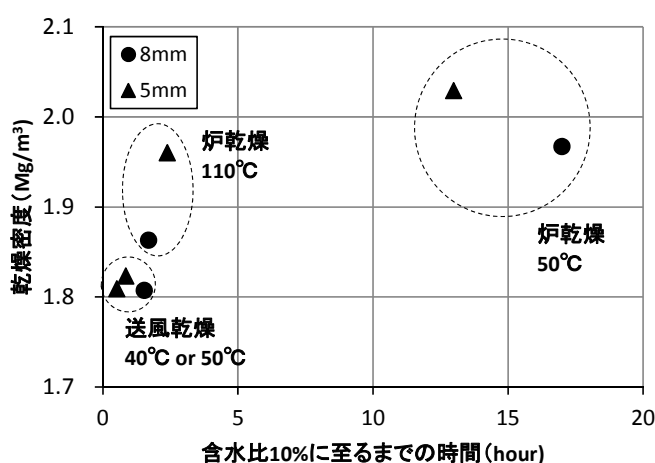


図 3.5-5 含水比が 10%に至るまでの時間と完全乾燥時の乾燥密度

方が乾燥密度が大きい。粒径が小さい方が同じ乾燥時間でも密度が高まり易い傾向があると言える。

3.6 3章の結論

ベントナイトペレットの新たな製造方法として、含水比が高く可塑性がある状態で球形のベントナイトペレットを成形し、それを乾燥することで比較的高密度なベントナイトペレットを製造する方法を考えた。代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1（クニミネ工業製）で、実際にベントナイトペレットを製造し、以下の結論を得た。

本製造法を用いることで、以下の特徴のベントナイトペレットが製造できることがわかった。

- (1) 球形である。
- (2) 乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度の比較的高密度である。
- (3) 単粒径で任意の粒径の選択が容易である。

また、本製造法では市販の造粒機器を用いるため、新たな機器開発が必要なく、このことは本製造法の利点の一つと考えられる。

本製造法の製造条件を決めるために造粒実験と乾燥実験を行った、造粒実験では、以下の知見が得られた。

- (1) ベントナイトは球形に造粒できることがわかり、造粒可能な含水比はおよそ 25～30%の範囲にあった。これは使用したベントナイトの塑性限界（クニゲル V1 の場合は 21%）よりも若干高い値である。
- (2) 造粒時の適正な水分量は、粒径（押し出し径）によって異なり、粒径が大きくなるにつれて若干多くする必要があることが推察される。
- (3) 造粒により製造できた乾燥前の球形ペレットは、乾燥密度 1.5Mg/m^3 程度と推測できる。

乾燥実験では、以下の知見が得られた。

- (1) 乾燥すると湿潤状態のベントナイトペレットは乾燥収縮し、乾燥密度が増加する。
- (2) 乾燥方法の違いで乾燥収縮の程度が異なり、ゆっくり乾燥させた場合は、乾燥密度 1.5Mg/m^3 程度の湿潤ペレットから乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度の乾燥ペレットになる。

参考文献

- 1) 中島貴弘, 織田信明, 千々松正和, 高橋隆太郎, 中越章雄, 石橋勝彦: 狹隘部におけるベントナイト締固めによる側部緩衝材(低透水層)の施工性確認ー地下空洞型処分施設性能確証試験によるー, 土木学会第 66 回年次学術講演会, pp.1-2, 2011.
- 2) 伊藤弘志, 伊藤弘志, 千々松正和, 村上利一: ベントナイト層の現場施工用材料の開発, 土木学会第 62 回年次講演会, pp.161-162, 2007.
- 3) 雨宮清, 中越章雄, 茂呂吉司, 千々松正和, 工藤康二, 田中幸久, 山崎直, 庭瀬一仁, 小松進一: ベントナイト原鉱の締固め特性に関する検討ー種々の材料に対する室内試験結果ー, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp.313-314, 2003.
- 4) 高尾肇, 増田良一, 上坂文哉, 竹ヶ原竜大, 雨宮清, 千々松正和: ベントナイトペレットの特性試験(その 1)ーベントナイトペレットの製作方法の検討および製作ー, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.473-474, 2002.
- 5) 杉田裕, 千々松正和, 雨宮清: ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討(その 1) ベントナイトペレット膨潤後の止水性に関する検討, 土木学会第 56 回年次講演会, pp.2-3, 2001.
- 6) 千々松正和, 雨宮清, 杉田裕: ベントナイトペレットを用いた緩衝材の隙間充填性に関する検討(その 2) 楔形状の隙間に対する充填性に関する検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.4-5, 2001.
- 7) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 13 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書ー遠隔操作技術高度化調査ー(2/2), 2002.
- 8) 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬: 緩衝材の特性試験(I), 動燃技術資料, 動燃技術資料, PNC8410 92-057, 1992.
- 9) 和田隆太郎, 西村務, 澤田昌久, 竹内靖典: 高品質・高施工性ベントナイト系成型品の開発ー1, 日本原子力学会 2000 秋の大会, 青森, 9 月 15~17 日, K34, 2000.
- 10) 和田隆太郎, 山口憲治, 播磨昇, 竹内靖典: 高品質・高施工性ベントナイト系成型品の開発ー2 ベントボール粒径配合による充填密度の制御, 日本原子力学会 2002 春の年会, 神戸, 3 月 27~29 日, M12, 2002.
- 11) 和田隆太郎, 山口憲治, 竹内靖典, 隈元純二, 小峯秀雄, 中西宏: 低透水層用充填材「ベントボール®」, 神戸製鋼技法, Vol.53 No.3, pp.72-77, 2003.

- 12) 中島均, 齊藤亮, 石井卓: 高密度で真球度が高いベントナイトペレットの製造方法, 日本原子力学会 2013 春の年会, 大阪, 3月 26~28日, A19, 2013.
- 13) 中島均, 齊藤亮, 石井卓: 乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.463-464, 2013.
- 14) 中島均, 齊藤亮, 石井卓: 乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法, 原子力バックエンド研究, Vol.21, No.2, pp.83-93, 2014.
- 15) 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 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999.
- 16) 土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎, 森北出版, pp.98-101, 1979.

第4章 ベントナイトペレット製造時の乾燥収縮挙動の検討

4.1 はじめに

本章では、ベントナイトペレット製造時の乾燥収縮挙動をより詳細に把握するために、乾燥条件を変えて乾燥実験を実施した^{1),2)}。3章で示したベントナイトペレットの製造方法では、乾燥方法の違いで乾燥後のペレットの密度が異なった。ゆっくり乾燥させることが密度の向上に効果的であることが定性的に把握でき、乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度と比較的密度が高いベントナイトペレットが製造できることが明らかになった。しかし、最適な乾燥条件の設定が可能となるような十分なデータは得られていなかった。一つの理由として、乾燥途中の乾燥収縮状態が把握できていないことがある。本章で実施した乾燥実験では、乾燥途中のベントナイトペレットの状態を把握し、乾燥条件との関係を考察した。なお、乾燥方法としては、実際のペレット製造における現実的な乾燥装置の選択を考慮し、回転式送風乾燥方式とした。

4.2節では、3章で示したベントナイトペレット製造方法の乾燥工程の課題を示し、解決に向けた考え方について論じた。

4.3節で乾燥実験の方法を説明し、4.4節に実験結果を示した。

4.4節では、実験結果を詳細に考察し、乾燥条件の設定に資する知見を示した。

4.2 乾燥工程の課題と課題解決に向けた考え方

4.2.1 製造方法の確立に係る乾燥工程の課題

3章で示した新たなベントナイトペレット製造方法では、高密度化に乾燥収縮を利用する。乾燥密度が 2.0Mg/m^3 程度と比較的密度が高いベントナイトペレットが製造できることは確認したが、乾燥条件の設定など乾燥工程については技術的に確立しているとは言えず、次のような課題が残っている。

- (1) 乾燥収縮で得られる最大の乾燥密度は 2.0Mg/m^3 程度が限界なのか？
- (2) 2.0Mg/m^3 の乾燥密度のペレットを得るための効率的な乾燥方法は何か？

1つ目の課題は、品質向上の観点である。乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度のベントナイトペレットは、3章で示したように、低温の炉乾燥で時間をかけて乾燥することによって得られた。乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度が乾燥収縮で得られる限界値でなければ、乾燥条件を最適化することでより乾燥密度が高いペレットを製造することが可能である。仮に、乾燥時間が長くなり、製造コストが増加したとしても、乾燥密度が高いベントナイトペレットはすき間充てん材料としての利用価値は高い。

2つ目の課題は、生産性向上の観点である。乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度が得られたときの乾燥方法は最適であったかという問題である。同じ乾燥密度のベントナイトペレットを製造するとしても、より効率のよい方法があるのではないかということである。ベントナイトペレットは 50°C 一定条件の乾燥炉で 32 時間を要して、含水比が 25%程度から 3~5%まで低下した。これにより 1.5Mg/m^3 程度の乾燥密度が 2.0Mg/m^3 に増加したが、この期間中に一定速度で乾燥収縮が進行したかは不明である。

仮に、乾燥初期の含水比が高い区間でのみ乾燥収縮が進行し、含水比が低くなった段階では乾燥収縮がまったく進行していないとすれば、より短い乾燥時間で同じ乾燥密度のベントナイトペレットが得られる。乾燥収縮を起こさない区間では、低温でゆっくり乾燥させる必要はなく、高温で乾燥させて乾燥速度を短縮すれば効率的である。

さらに言うと、乾燥させても乾燥密度が変わらないのであれば、乾燥させる必要もないとも言える。すき間の充てん材料としてベントナイトペレットは、乾燥密度が同じであれば、すき間の充てん密度が変わらないと考えられるからである。

4.2.2 課題解決に向けた考え方

土質工学の分野では、一般的に水で飽和した粘性土の収縮挙動は次のようになると言われている³⁾。乾燥初期においては一様にゆっくり乾燥させると、失われた水と同量の体積変化が起き、最大の乾燥収縮挙動を生じる。この段階では粘土粒子は次第に接近していくが、乾燥が進み水分量が少なくなると、粘土粒子はそれ以上接近できなくなる。これは、ある水分状態から先は乾燥収縮を起こさず、乾燥密度が増加しなくなることを示している。

ベントナイトペレットの収縮挙動においても、図 4.2-1 に示すように、このような挙動を前提にして乾燥収縮、すなわち乾燥密度増加挙動を検討することが、課題を解決することに有効であると考えられる。乾燥初期において、失われた水と同量の体積変化が起きているかどうかを把握すると、より乾燥密度を増加させる可能性について検討できる。また、

水分量が低下しているにも関わらず乾燥密度が増加しなくなる点を把握すれば、より合理的な乾燥時間の設定が可能になるものと思われる。このためには、乾燥期間中のベントナイトペレットの状態の変化を取得することが必要となる。

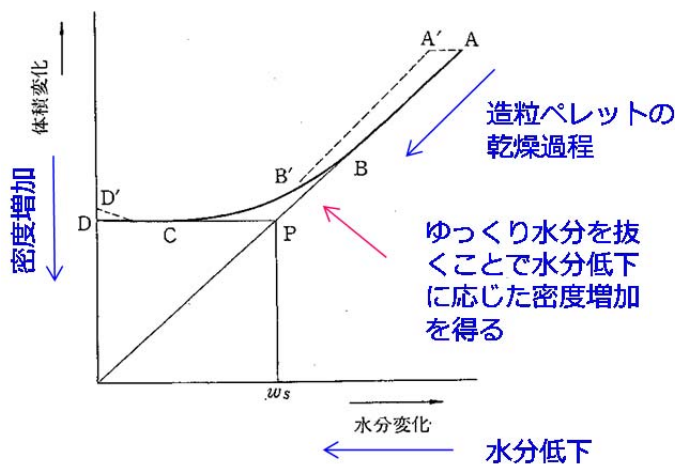


図 4.2-1 乾燥収縮の密度増加の概念（文献 3）に加筆

一方、最大の乾燥収縮

を起こさせるためには一様にゆっくり乾燥させることが必要であるとされているが、どのような乾燥条件でこのような状態の乾燥が可能となるのかについては明らかにされていない。一般的には、乾燥時間を遅くするためには、温度が低い方が、湿度が高い方が、風速が遅い方が有利であると考えられる⁴⁾。しかし、それぞれのパラメータがどのように乾燥収縮に影響を与えているのかについては判断できず、これらを個別に評価することが合理的な乾燥方法を確立するうえで重要である。

4.3 乾燥実験の方法

4.3.1 実験材料

第 3 章で示したベントナイトペレット製造方法の造粒工程だけを実施して、乾燥前の湿潤状態のベントナイトペレットを製造し、これを実験材料として用いた。ベントナイトには国産の代表的な Na 型ベントナイトであるクニゲル V1（クニミネ工業製）を用い、造粒含水比は 25%程度であり、押出し径は 8mm とした。実際に実験に用いた湿潤ペレットの状態は、後述するように含水比は 23%程度、乾燥密度は 1.6Mg/m³程度であった。

4.3.2 乾燥方法

乾燥方法として送風乾燥方式を選択した。理由としては、実験としての技術的な観点と乾燥技術として有用性の観点の 2 つがある。

前者の実験技術の観点は、データ取得のために乾燥途中で取得するサンプルの代表性である。乾燥実験ではベントナイトペレットを数 kg～数 10kg の単位で乾燥させる。途中段階のペレットの状態は、そのうち少量のペレットの抜きだして確認することになる。得られたデータが代表性を持つためには、すべてのベントナイトペレットを均等に同じ状態で乾燥させなければならない。このためには乾燥中に適切に攪拌する必要がある。3章で示した乾燥実験では、送風乾燥方式、炉乾燥方式のどちらも、攪拌しておらず、新たな方式の乾燥方式を選択することが必要であった。

後者の乾燥技術の観点は、実験においても現実的な乾燥方法を見通した視点が、乾燥技術の確立のために有効であると考えたからである。乾燥速度に影響を与える要因として、温度、湿度、風速などが考えられるが、このうち湿度に関しては、制御機構を実用的に要求すると製造コストの増加を招くと考えられる。現実的な乾燥方法は、温度と風速を制御して行われていることが多い。3章で示した乾燥実験の送風方式では、ベントナイトペレットの攪拌を行っていなかった点や、温度や風速を適切に制御できていなかった恐れなどがあるため、今回の実験では送風方式の乾燥方法を乾燥実験の方法として選択した。

実際に想定した乾燥装置は、図 4.3-1 に示すような回転型送風乾燥方式である。回転軸に対して直角方向から温風を送風する方式であり、ベントナイトペレットを均一に乾燥させるため適している。また、乾燥物を入れるための空間は大型のものでは 10m³ の容積があり、実用性は高いと考えられる。

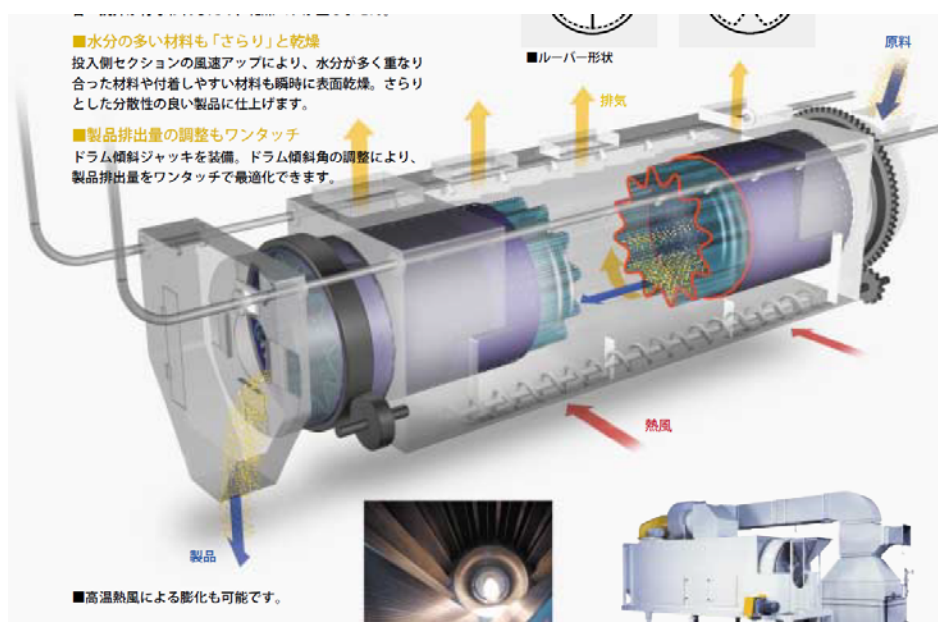


図 4.3-1 回転型送風乾燥方式の実用機概念 (文献 5) より引用

実験に用いた乾燥装置は、図 4.3-1 で示した乾燥機のテスト機であり、図 4.3-2 に示す構造となっている。円筒部がメッシュ製の円筒容器の内部にベントナイトペレットを入れ、容器の外部から内部に風を送ることでペレットを乾燥させる。円筒容器の前方と後方は金属版で仕切られているため、乾燥対象であるベントナイトペレットに均一に送風される。

使用した円筒容器は図 4.3-3 に示すように、金属製で円周側がメッシュ構造になっている。中心軸が水平になるように乾燥機に装着され、円筒容器が一定方向に回転することで内部のベントナイトペレットが重力で流動化し、攪拌される。内部には山形の突起が4つ設けてあり、この突起がベントナイトペレットを均一に攪拌することに寄与する。直径 560mm、奥行き 400mm であり、容積は約 100 リットルである。

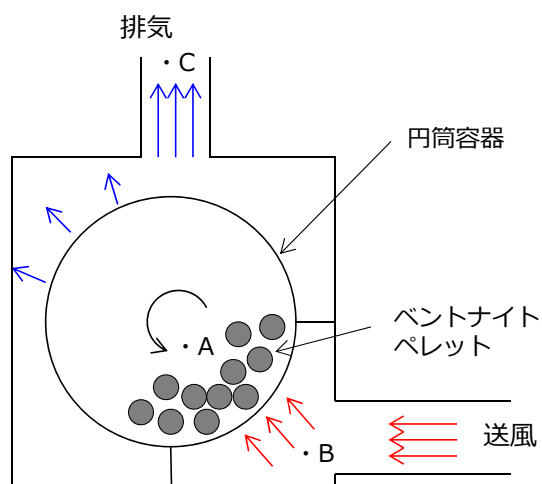


図 4.3-2 乾燥方法の概念

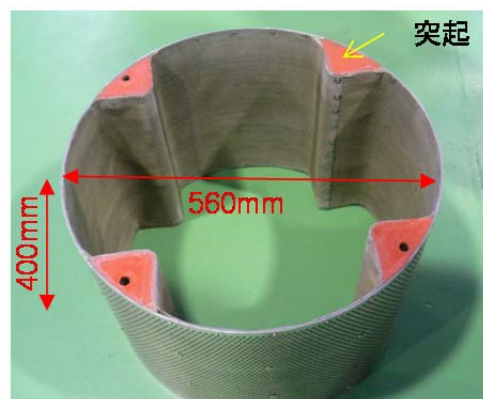


図 4.3-3 乾燥容器

4.3.3 実験ケース

乾燥実験は表 4.3-1 に示すように 5 ケースを実施した。まずはじめに、通過風速を 0.55m/s に固定し、送風温度は 110℃、60℃、常温の 3 種類に変え、温度の違いによるペレットの乾燥速度の変化と乾燥密度の変化を調べた（ケース 1～3）。次に、通過風速を 0.55m/s から 0.20m/s に低くすることによる乾燥挙動の違いを、送風温度が 60℃と常温の場合について行った（ケース 4～5）。このうち、通過風速が 0.20m/s で送風温度が常温の場合のケース 5 については、水分低下が収束したのちに、送風温度を 110℃に上げて、さらに追加乾燥させた。

通過風速とは、円筒容器に所定のベントナイトペレットを挿入した状態での材料を通過

した後の風速である。通過風速は所定量の材料を円筒容器に投入したのちに点 A の風速を風速計で測定し、所定風速になるように送風ダイヤルを調整した。

送風温度は点 B の位置で測定し、所定温度となるように常温空気を加熱するバーナーの出力を調整した。送風温度が常温の場合はバーナーを用いず、送風のみを行った。このため、実際の送風温度は、実験期間中の外気温の変化に影響を受け、表 4.3-1 に示すように変動した。

円筒容器の回転速度は 2 分で 1 回転とした。ベントナイトペレットの投入量は各ケースとも 10kg とした。乾燥前のベントナイトペレットのかさ密度は約 1.0Mg/m³程度であったことから、円筒容器内のペレット占有率は約 10%である。

乾燥時間はベントナイトペレットの水分変化が一定になるまでとし、このため、実験ケースによって異なる。実験中の水分変化の推移は、電気水分計で少量のペレットを測定し、目途をつけた。

表 4.3-1 乾燥実験の実験ケース

実験 ケース	通過風速 (m/s)	送風温度 (°C)	乾燥時間 (hours)
1	0.55	110°C	2.5
2	0.55	60°C	3.0
3	0.55	常温 (31~39°C)	16.5
4	0.20	60°C	7.5
5	0.20	常温 (24~34°C) → 110°C	29.0

4.3.4 測定項目

乾燥実験時の測定項目は、温度・湿度の変化、ペレットの含水比の経時変化、ペレットの乾燥密度の経時変化とした。

温度と湿度のデータは、図 4.3-2 に示すように乾燥機の中で、温風がペレットを通過する前の点 B と、通過した後の点 C で計測した。また、環境状態として乾燥機の周囲でも同様に計測した。なお、110°Cの送風温度で乾燥したケースでは、温度の計測は行ったが、湿度の計測は計測器の都合で行わなかった。

乾燥の進展に伴うベントナイトペレットの状態変化を把握するために、乾燥中に適宜、少量のサンプルを採取し、含水比と単体密度の測定を行った。サンプル採取の時間間隔はケース毎に異なり、おおよそ含水比については 10~40 分間隔、単体密度については 10

分間隔を基本とした。

含水比の測定は、ペレット 10g 程度を同時刻に 3 点採取し、110℃の乾燥炉で 24 時間以上乾燥させ、水分低下量より算定し平均値をとった。

単体密度の測定は、1g 程度のペレットを同時刻に 3 点採取し、水中浸漬し水置換法により湿潤密度を求めたのちに、別途算定した含水比もしくは含水比の推定値を用いて乾燥密度に換算し平均値をとった。

4.4 乾燥実験の結果

4.4.1 温度・湿度の変化

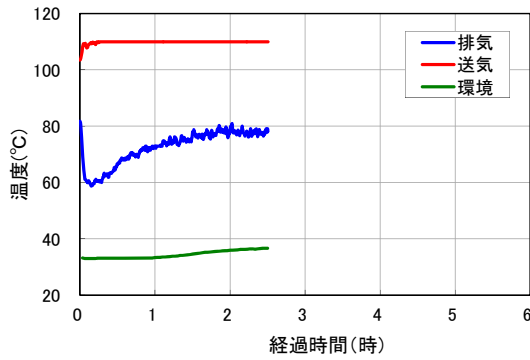
乾燥期間中に計測した温度と湿度の経時変化を図 4.4-1 および図 4.4-2 に示す。各グラフにおいて、排気はベントナイトペレットを通過したあとの温度と湿度を示しており、送気はベントナイトペレットを通過する前の温度と湿度を示している。実験では送気の温度が設定した乾燥温度になるように制御した。また、環境は乾燥装置の外側の周辺の温度・湿度を示している。

まず、送気温度に着目すると乾燥温度の設定状態がわかる。乾燥温度を 110℃に設定したケースでは、図 4.4-1(a)に示したケースでは 110℃のほぼ一定温度に保たれていたが、図 4.4-2(c)に示したケースではバーナーの失火などがあり一時的な温度低下があった。60℃に設定したケースでは、図 4.4-1(b)に示したケースでは 60℃～63℃に保たれていたが、図 4.4-2(a)に示したケースではバーナーの出力が安定せず、54℃～64℃で変動した。常温で乾燥したケースでは、バーナーによる温度制御をおこなっていないため、乾燥温度は気温の日変動や時間変動に依存しており、図 4.4-1(c)に示したケースでは 31～39℃、図 4.4-2(b)に示したケースでは 24～34℃であった。このように、乾燥条件の温度制御は完全ではないが、110℃、60℃、常温と設定温度が大きく異なる場合の、ベントナイトペレットの乾燥挙動の違いを比較するには概ね設定温度が実現できていたものと考えられる。

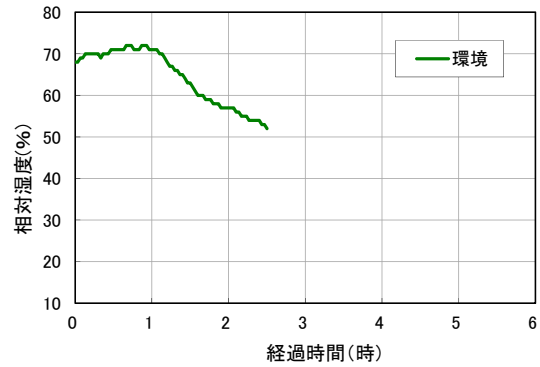
次に、排気温度に着目するとペレットを通過した後の温度変化がわかる。乾燥温度を 110℃もしくは 60℃に設定したケースでは、ペレットの乾燥にともない蒸発熱が奪われるため、通過前よりも低くなっている。110℃乾燥の場合には図 4.4-1(a)、図 4.4-2(c)ともに、乾燥初期には 60℃程度まで急激に排気温度が低下し、乾燥の進展とともに 70～80℃まで温度が戻った。60℃乾燥の場合には図 4.4-1(b)、図 4.4-2(a)ともに、40～45℃まで低下した

のちに 48～55℃程度まで温度が戻った。これに対し、常温乾燥の場合には送気温度と排気温度に大きな違いはなかった。乾燥温度が低い場合は、時間当たりの蒸発量が小さいためと考えられる。

送風空気の相対湿度は、室内空気をバーナーで加熱したため、環境の湿度よりも大幅に低下した。60℃乾燥の場合は図 4.4-1(b)および図 4.4-2(a)に示すように、環境の相対湿度が 50～70%であるが送風の相対湿度は 15～20%程度である。一方、ペレットを通過した後の空気はペレットから蒸発した水分により相対湿度が上昇していることがわかる。60℃乾燥の場合、15～20%の相対湿度で供給された空気は、ペレット通過後では乾燥初期には 45%程度となっており、乾燥の進展とともに 20～30%程度の相対湿度に低下した。図 4.4-1(c)および図 4.4-2(b)に示した常温乾燥の場合は、ペレット通過前とペレット通過後の相対湿度はそれほどかわっておらず、このことから時間当たりの蒸発量が小さく、ペレットの水分低下速度が遅いことがわかる。

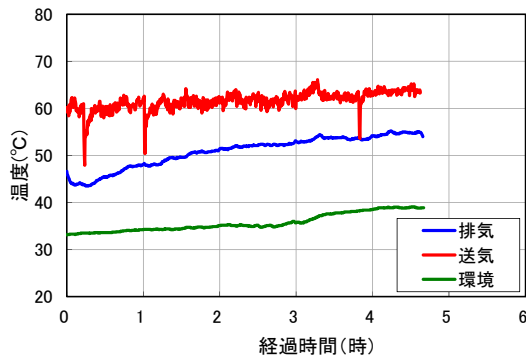


① 温度の変化

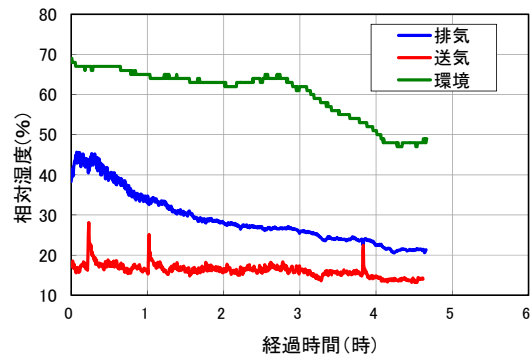


② 相対湿度の変化

(a) ケース 1 (通過風速 0.55m/s, 乾燥温度 110°C)

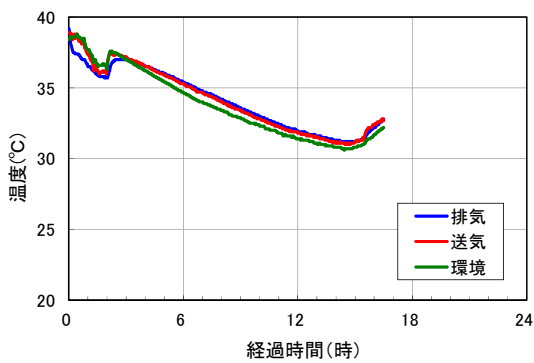


① 温度の変化

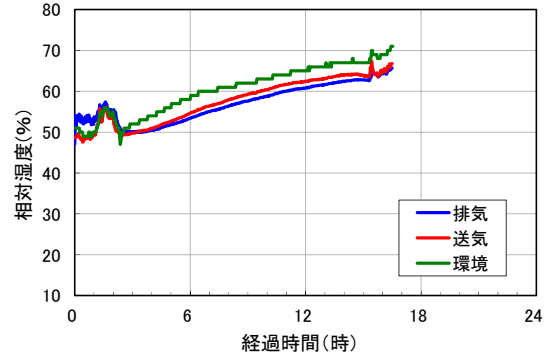


② 相対湿度の変化

(b) ケース 2 (通過風速 0.55m/s, 乾燥温度 60°C)



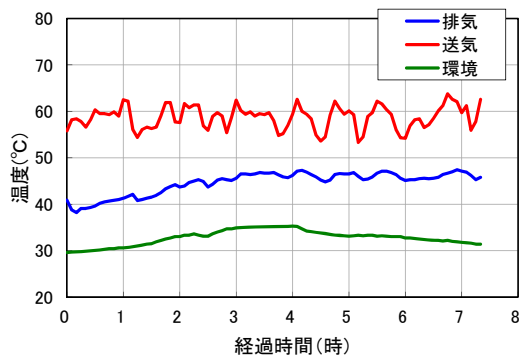
① 温度の変化



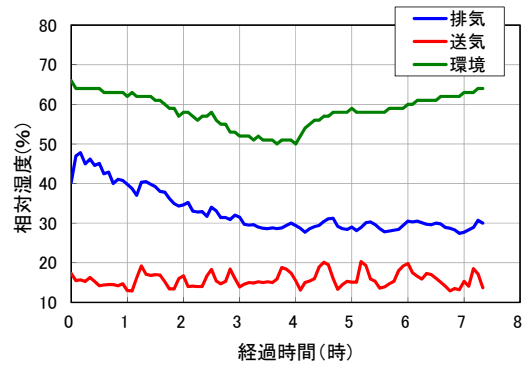
② 相対湿度の変化

(c) ケース 3 (通過風速 0.55m/s, 常温)

図 4.4-1 ベントナイトペレットの温度・湿度の経時変化 (ケース 1 ~ ケース 3)

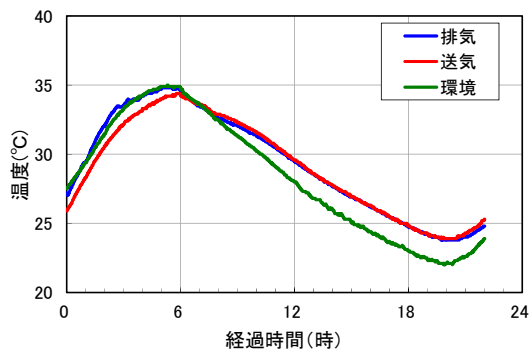


① 温度の変化

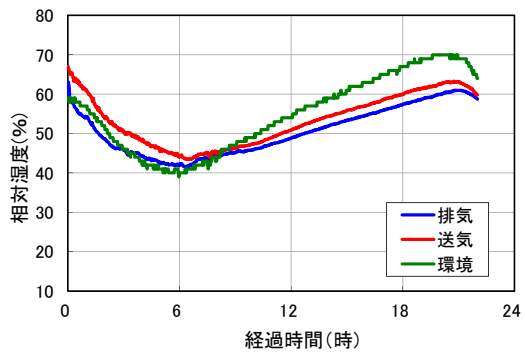


② 相対湿度の変化

(a) ケース 4 (通過風速 0.20m/s, 乾燥温度 60°C)

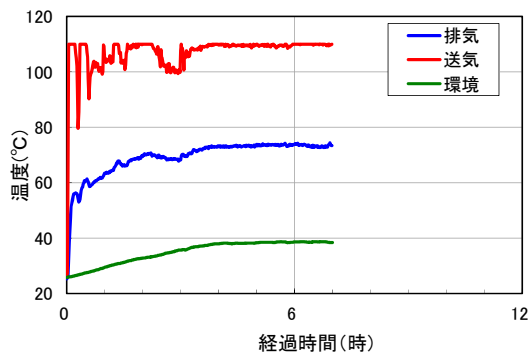


① 温度の変化

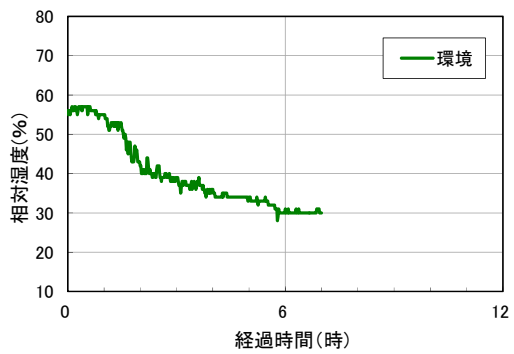


② 相対湿度の変化

(b) ケース 5 (通過風速 0.20m/s, 常温)



① 温度の変化



② 相対湿度の変化

(c) ケース 5 (通過風速 0.20m/s, 110°C)

図 4.4-2 ベントナイトペレットの温度・湿度の経時変化 (ケース 4~ケース 5)

4.4.2 含水比の経時変化

図 4.4-3 に乾燥にともなうペレットの含水比の経時変化を示す。乾燥温度や通過風速がの違いが乾燥速度に影響することがわかる。ここでは、乾燥速度を時間当たりの含水比低下量とした。すなわち乾燥速度は乾燥の進展にともなって変化している。

すべてのケースで乾燥の進展につれて乾燥速度は小さくなるが、乾燥初期の傾きで比較すると、乾燥温度が高いほど乾燥速度が速いことがわかる。一定の通過風速 0.55m/s で乾燥させたケース 1～3 を比較すると、乾燥温度 110℃ の場合が最も乾燥速度が速く、常温の場合が最も乾燥速度が遅い。通過風速 0.2m/s のケース 4～5 においても同様である。

同様に、通過風速の違いも乾燥速度に影響を与える。乾燥温度 60℃ で乾燥した場合のケース 2 とケース 4 を比較しても、常温で乾燥した場合のケース 3 とケース 5 を比較しても、通過風速が大きい方が乾燥速度が速いことが確認できる。

また、すべてのケースで、乾燥速度は乾燥の進展につれて遅くなり、やがてペントナイトペレットの含水比が一定値に収束した。乾燥温度が低いほうが、収束した時点の含水比が大きい。収束値は常温の場合は含水比 10～12% 程度、60℃ の場合は含水比 6% 程度であり、これは通過風速には依存しないと考えられる。110℃ 乾燥は、乾燥時間の関係で収束値が得られていないが、含水比 0% に収束するものと思われる。

常温で乾燥したケースの収束時点での含水比は、一般に粉体ペントナイトの保管時の自然含水比は 8～12% 程度であると言われていることと一致する。自然含水比は季節や保管状況などにも関係するので、今回の常温乾燥での収束含水比も、自然含水比と同程度であると考えられる。

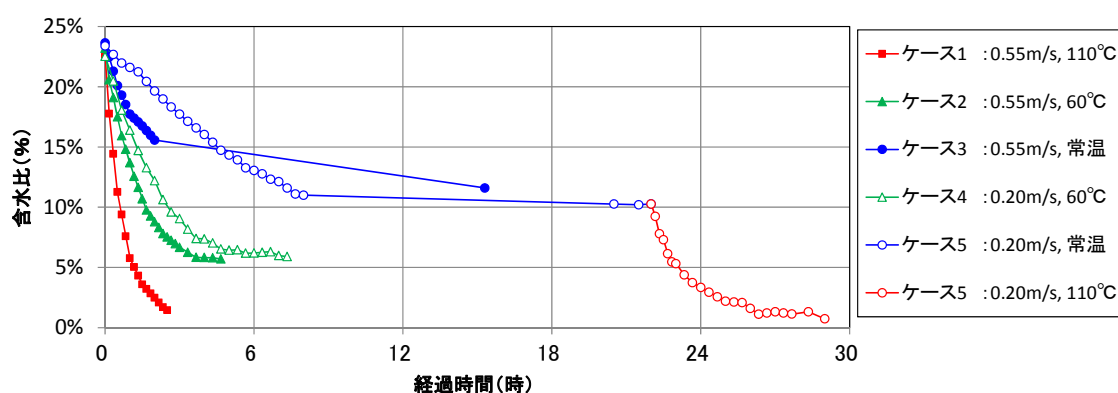


図 4.4-3 ペントナイトペレットの含水比の経時変化

4.4.3 乾燥密度の経時変化

図 4.4-4 にベントナイトペレットの乾燥密度の経時変化を示す。すべてのケースにおいて、乾燥にともない乾燥密度が増加していることがわかる。乾燥密度の増加は、どのケースも乾燥密度 1.9Mg/m^3 程度で収束している。収束までに要する時間は、乾燥温度が高いほうが、また通過風速が速いほうが短い。

乾燥密度が収束するまでの時間は、図 4.4-3 で示した含水比の低下曲線と比較すると、含水比が低下している間は乾燥密度が増加し、含水比の低下が収束した時点で乾燥密度の増加も収まっていることが推測できる。乾燥温度を2段階に変えて実施したケース5においても、常温乾燥で含水比、乾燥密度ともに収束したのちに、 110°C の乾燥温度で再乾燥したときにも、含水比は再度低下し、それにもなって乾燥密度が増加していることがわかる。これらのデータは、含水比の低下が乾燥密度の増加の要因になっており、乾燥密度の増加が乾燥収縮であることを示していると言える。

なお、どの乾燥条件においても乾燥密度の収束値が 1.9Mg/m^3 程度と同じであることに関して、必然的に同じになるのか、もしくは偶然に同じであったのかについて、メカニズムを考察することは難しいが、技術開発としての意義は次のようになる。乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度の高密度なベントナイトペレットまで求めなくとも、乾燥密度 1.9Mg/m^3 程度のベントナイトペレットにニーズがあるのなら、 110°C の乾燥温度、 0.55m/s の通過風速で乾燥することで、もっとも速く目的の密度のベントナイトペレットの乾燥ができることになり、製造効率の観点で有利であると言える。

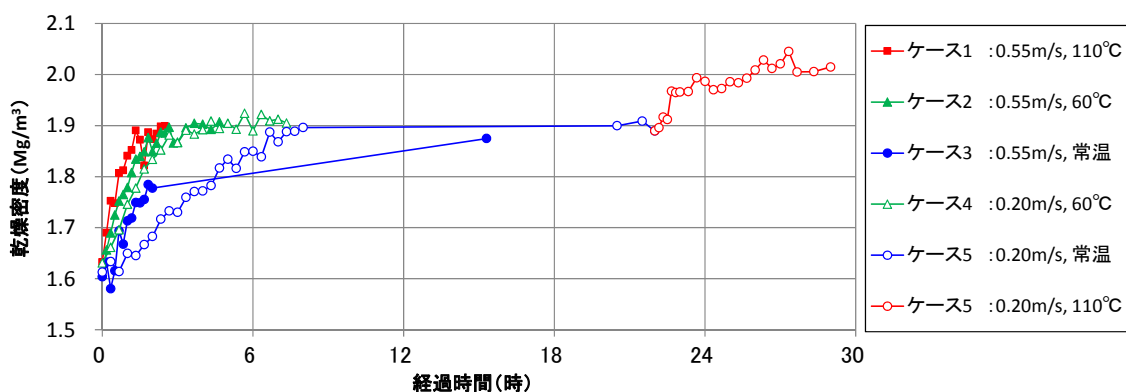


図 4.4-4 ベントナイトペレットの乾燥密度の経時変化

4.5 考察

4.5.1 含水比低下と乾燥密度増加の関係

図 4.4-3 の含水比の経時変化と図 4.4-4 の乾燥密度の経時変化を比較すると、乾燥密度の増加は含水比の低下と密接にかかわっており、含水比の低下が終了した時点で乾燥密度の増加も終了していることが推測された。

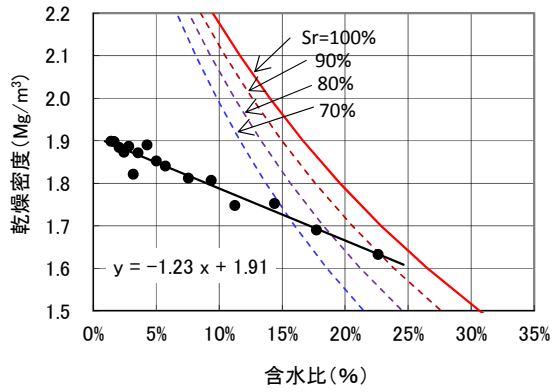
含水比、乾燥密度の時間的な変化の測定結果である図 4.4-3 および図 4.4-4 を用いて、同一時刻の含水比と乾燥密度の値を対応させることによって、図 4.5-1 に示すように含水比と乾燥密度の関係を、各実験ケース毎に得ることができる。乾燥中のある段階において含水比と乾燥密度が決まれば、そのときの飽和度も計算できるので、この飽和度を把握できるようにするために、図中には等飽和度線も示した。

まず、図 4.5-1 で乾燥前の状態が把握できる。図中の右下のプロットが乾燥開始時の状態である。乾燥実験に供した湿潤状態のベントナイトペレットは、同条件で製造したものをを用いているため、すべてのケースで乾燥前のベントナイトペレットの状態は同じである。測定結果にバラツキなどがあるが、含水比 23~24%程度で、乾燥密度は 1.6Mg/m³程度であり、飽和度は 90%程度である。

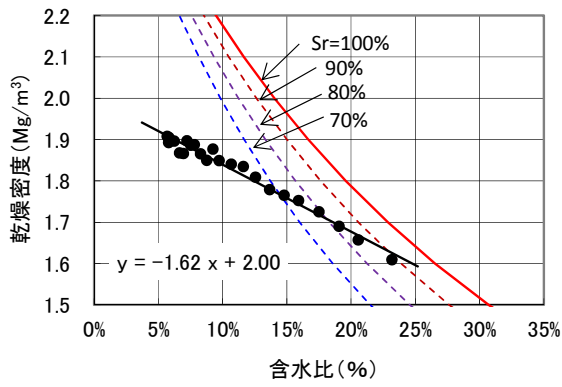
乾燥の進展にともない含水比は低下し、乾燥密度は増加する。乾燥中の含水比と乾燥密度の変化は、含水比は低下し横軸で左方向に移動し、これにともなって乾燥密度は増加し縦軸を上方向に移動する。よってプロットの時間経過は、グラフ上で右下から左上に移動する。

図 4.5-1 の全ケースにおいて、含水比の低下にともなう乾燥密度の増加は、乾燥開始から乾燥終了まで連続して生じていることがわかる。また、この変化は、ほぼ直線的な関係として表れている。すなわち、含水比が増加すれば、ケース毎に量の差はあるものの必ず乾燥密度が増加すると言える。

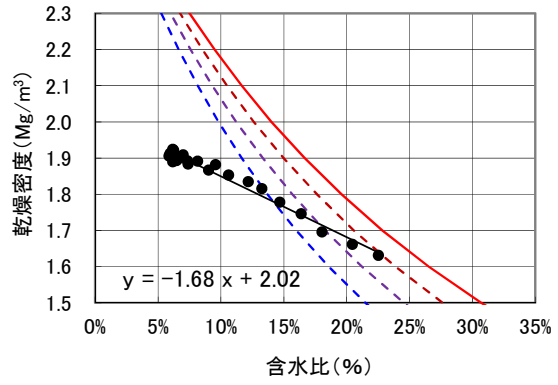
さらに特徴的なのは、このような含水比低下に伴う乾燥密度増加が、含水比が低い領域においても認められることである。例えば、図 4.5-1(a)に示すケースでは、含水比 10%~0%のベントナイトの自然含水比よりも低い領域においても、乾燥密度の増加が起こっていることが確認できる。同様に、図 4.5-1(b)、図 4.5-1(d)においても、含水比 10%~5%の範囲で同じことが確認できる。すなわち、含水比が収束するまで乾燥密度は増加し続けると言える。



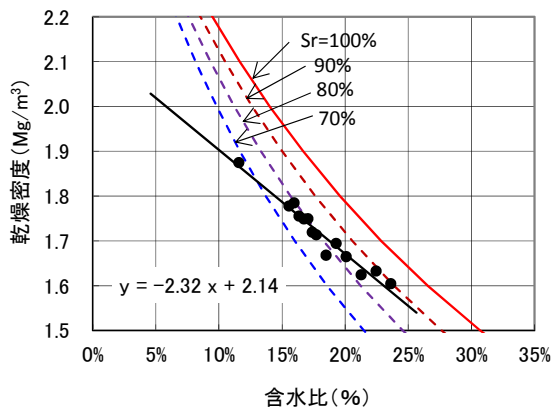
(a) ケース 1 : 0.55m/s, 110°C



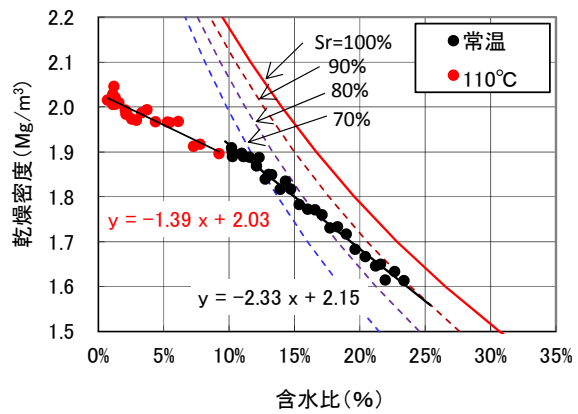
(b) ケース 2 : 0.55m/s, 60°C



(d) ケース 4 : 0.20m/s, 60°C



(c) ケース 3 : 0.55m/s, 常温



(e) ケース 5 : 0.20m/s, 常温

図 4.5-1 ベントナイトペレットの含水比と乾燥密度の関係

4.5.2 乾燥条件が乾燥密度の増加に与える影響

図 4.5-1 において、乾燥開始から含水比が収束する乾燥終了までの期間において、含水比低下と乾燥密度増加の関係は直線的な比例関係が認められると仮定すると、その関係を(4-1)式で表すことができる。このなかで、含水比と乾燥密度の傾きを、乾燥密度増加指数と名付けた。

$$\rho_d = -aw + b \quad (4-1)$$

ρ_d :乾燥密度 (Mg/m³) ,

w :含水比 (%) ,

a :定数=乾燥密度増加指数,

b :定数.

図 4.5-1 のデータに最小二乗法を用いて、ケース毎に(4-1)式の回帰式を求めた。ケース 5 については、2 段階の乾燥温度で乾燥させており、傾きが異なると考えられるので、2 つにわけて求めた。得られた回帰直線は、図 4.5-1 に既に示している。表 4.5-1 は、2 つの定数のうち a で示した乾燥密度増加指数を示したものである。

表 4.5-1 各ケースにおける密度増加指数

実験 ケース	通過風速 (m/s)	送風温度 (°C)	乾燥密度増加指数 (Mg/m ³)
1	0.55	110°C	1.23
2	0.55	60°C	1.62
3	0.55	常温 (31~39°C)	2.32
4	0.20	60°C	1.68
5	0.20	常温 (24~34°C)	2.33
		→ 110°C	1.39

図 4.5-2 に、表 4.5-1 に示した密度増加指数を、乾燥条件として設定した通過風速および乾燥温度に対してプロットした。常温乾燥のケースは乾燥期間中に温度が変動しているため、30°Cの位置にプロットした。

乾燥密度増加指数は、乾燥温度によって異なることが明らかに認められる。乾燥温度

が低い方が乾燥密度増加指数が大きい。また、その効果は乾燥温度が低いほうが強い。乾燥密度増加指数が大きいことは、含水比の低下が乾燥密度の増加に、より強く反映されていることを示している。乾燥温度が低いと乾燥がゆっくり進むことになるので、より大きな乾燥収縮が起こる。

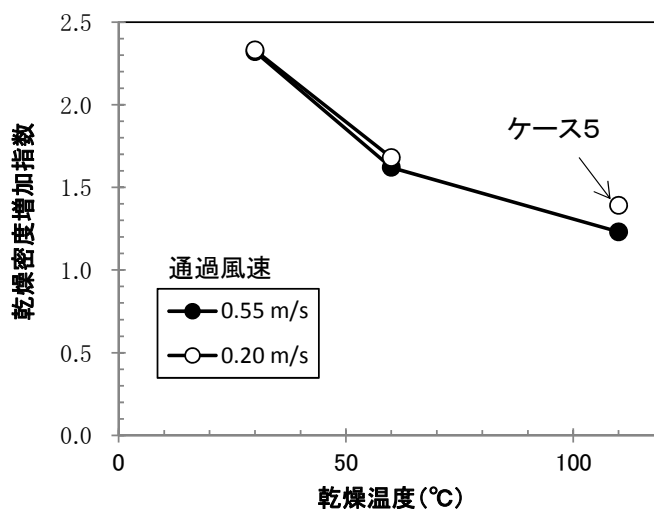


図 4.5-2 各乾燥条件における乾燥密度増加指数

一方、乾燥密度増加指数に与

える通過風速の影響は、乾燥温度ほどは顕著でない。110°Cの送風温度で乾燥した場合には通過風速が遅いほうが乾燥密度増加指数は大きくなった。しかし、常温乾燥の場合は通過風速の違いが乾燥密度増加指数に与える影響は確認できなかった。

以上より、常温程度の低い送風温度で乾燥させることで乾燥密度増加指数が高くなり、含水比の低下が密度増加に直結する良好な乾燥収縮を示すことがわかった。

4.5.3 2段階乾燥の効果

低い送風温度で乾燥させると、水分低下がゆっくり進み、乾燥密度増加指数が大きくなり、良好な乾燥収縮が得られる。しかし、送風温度が低い場合は、乾燥密度増加指数が大きくても、含水比の低下は完全乾燥に至る前に収束し、結果的には乾燥密度はあまり高くない。実験の結果では、110°C乾燥では含水比 0%程度まで乾燥した状態で乾燥密度 1.9Mg/m³となったが、常温乾燥では含水比 10%程度まで乾燥した状態で水分低下が止まり、乾燥密度も 1.9Mg/m³程度までしか増加しなかった。

含水比低下にともなう乾燥密度増加は、乾燥条件が同じであれば乾燥期間中に一定の傾き（乾燥密度増加指数）をもっているため、含水比が低い領域でも乾燥密度の増加が起こることを示しており、常温乾燥で水分低下が収束して乾燥密度も収束した状態になってからでも、さらに温度を上げて乾燥させれば乾燥収縮が進むと考えた。

このことを確認するために、ケース5では、常温で乾燥し含水比の低下と乾燥密度の増加が収束した時点から、乾燥温度 110°Cで追加乾燥させた。図 4.5-1(e)に示した結果からわ

かるように、再乾燥による含水比 10%程度から含水比 0%に至る区間でも乾燥密度が増加した。ケース 5 の 110℃乾燥における含水比 10%程度から 0%程度で得られた乾燥密度増加指数は 1.45Mg/m^3 であり、ケース 1 での含水比 24%程度から 110℃で乾燥させたときの乾燥密度増加指数は 1.23Mg/m^3 である。ケース 5 のほうが通過風速が小さいので、乾燥密度増加指数は低くなっており、より大きな乾燥収縮を生じることとなった。

以上より、できるだけ低い温度でゆっくりと乾燥させ良好に乾燥収縮を起こさせたのちに、段階的に送風温度を上げてさらに乾燥させることが、乾燥密度が高いペレットを製造するための方法として有効であると考えられる。

今回の実験では、常温乾燥のあとに 110℃乾燥を行ったが、常温乾燥、60℃乾燥、110℃乾燥としたほうが、若干であるが乾燥密度が高いペレットが得られる可能性は高いと考えられる。

4.5.4 含水比低下と空隙増加の関係

(1) 乾燥収縮の経路

まず、飽和した土で考える。飽和した土が乾燥により水を失ったときの状態変化は、図 4.5-3 および図 4.5-4 に示すように 2 つの両極端な状態変化を考えると、その中間的な挙動として現れる。図 4.5-3 はまったく乾燥収縮しない場合を示している。水が占めていた空間に空気が浸入し、土の全体積は変化しない。乾燥密度は、固相の重量を全体の体積で除した値で表されるので、全体の体積が変化しないこの場合には水が抜けても土の乾燥密度は変化しない。図 4.5-4 は最も乾燥収縮する場合である。水が占めていた空間が空気で置き換わらなければ、結果として水の占めていた空間の分だけ土全体の体積が小さくなる。これにより乾燥密度が増加する。実際には、乾燥途中で図 4.5-4(b)のような状態はあり得ても、最終的に図 4.5-4 (c)のような状態になることは起こりえない。土の乾燥密度が固相の鉱物の比重と同じになることを示しているからである。

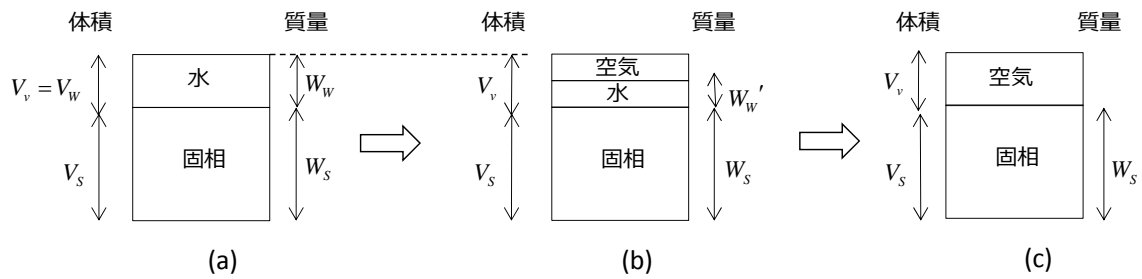


図 4.5-3 乾燥時の土の状態変化（乾燥収縮しない場合）

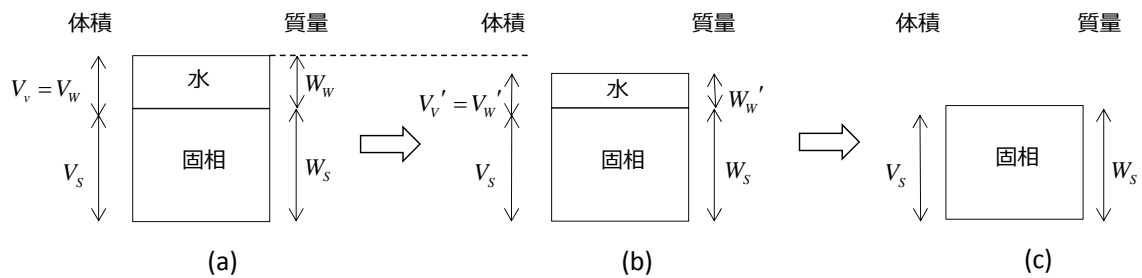


図 4.5-4 乾燥時の土の状態変化（最も乾燥収縮する場合）

図 4.5-5 は、このような飽和した土の乾燥収縮挙動を別の方法で表したものである。横軸は含水比を示しており、縦軸は単位固相重量当たりの体積を示している。点 A が乾燥前の状態であるとする、図 4.5-3 で示した乾燥収縮しない場合は、点 A から点 B への変化で表される。含水比が低下しても全体積は変わらない。図 4.5-4 で示した最も乾燥収縮する場合、点 A を起点として、点 D を経て点 C に至る。ここで点 A から点 C は直線であり、その傾きは 1 である。横軸の含水比は固相の重量に対する液相の重量であり、水の比重を 1 とすると固相重量に対する液相の体積としても値としては同じである。一方、縦軸は固相重量に対する全体積であり、全体積の低下量が失われた水の体積と同じである図 4.5-4 の場合には、傾きが 1 となる。

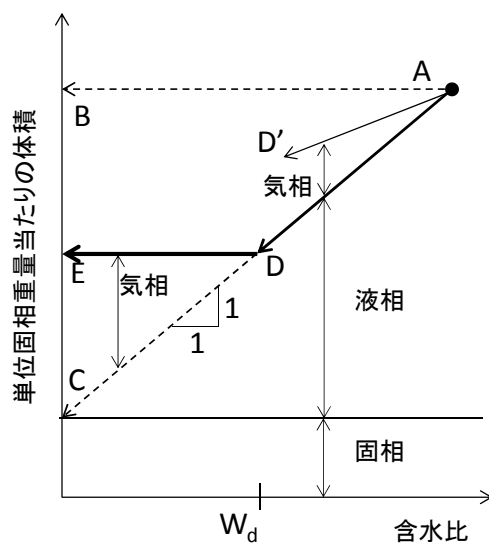


図 4.5-5 一般的な飽和粘性土の乾燥収縮挙動

一般的な飽和粘性土は、ゆっくりと一様に乾燥させると、乾燥の初期には

図 4.5-4 のような挙動を示し、ある含水比を境に図 4.5-3 のような挙動を示すと言われている。この挙動を図 4.5-5 に示すと、太い実線で示すようになる。点 A から点 D を経て点 E に至る。点 D の含水比が W_d であり、この含水比までは最大限の乾燥収縮を生じ、その後は体積変化が起こらないことを示している。

しかし、ゆっくりと一様に乾燥できていない場合は、点 A から点 D' のような経路になると考えられる。この場合は、初期の含水比から W_d に至る区間でも空気が浸入し、体積の収縮を妨げている。

(2) 乾燥時の含水比変化にともなう空隙変化の求め方

本章で実施した乾燥試験ベントナイトペレットの状態は、乾燥前においても飽和度 90% 程度と不飽和状態であり、乾燥の進展とともにペレット内に空気が浸入していると考えられるので、図 4.5-6 のような状態を考える。

土は固相、液相、気相で構成されている。ベントナイトペレットを乾燥した場合に変化するのは液相と気相であり、固相は質量、体積ともに変化しないので、単位固相質量あたりでそれぞれの変化を示すと便利である。

(4-2)式はペレットの状態を3相に分けて、単位固相質量当たりで表したものである。左辺が全体を示し、右辺は第1項から固相、液相、気相である。

$$\frac{V}{W_s} = \frac{V_s}{W_s} + \frac{V_w}{W_s} + \frac{V_A}{W_s} \quad (4-2)$$

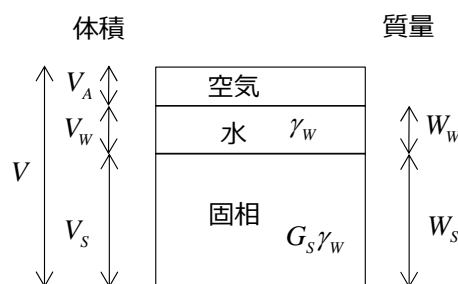


図 4.5-6 乾燥中の任意の時点でのベントナイトペレットの状態

(4-2)式の左辺の単位固相質量あたりの全体積は、固相質量を全体積で除して得られる乾燥密度の逆数であり (4-3)と表される。

$$\text{単位固相質量あたりの全体積} \quad \frac{V}{W_s} = \frac{1}{\rho_d} \quad (4-3)$$

(4-2)式の右辺第1項の単位固相質量あたりの固相の体積は(4-4)で表される。固相の比重および水の単位体積質量は、乾燥期間中においても変化しないため定数である、。

$$\text{単位固相質量あたりの固相体積} \quad \frac{V_s}{W_s} = \frac{1}{G_s \gamma_w} \quad (4-4)$$

G_s : 固相の比重(-),

γ_w : 液相の単位体積質量(Mg/m³).

(4-2)式の右辺第 2 項の単位固相質量あたりの液相の体積は (4-5)で表され、乾燥期間中に変化する含水比の一次関数となる。

$$\text{単位固相質量あたりの液相体積} \quad \frac{V_w}{W_s} = \frac{w}{\gamma_w} \quad (4-5)$$

w : 含水比(-).

(4-4)式および(4-5)式より、単位固相質量あたりの固相と液相の合計は、乾燥密度の変化によらず含水比の変化のみで表され、(4-6)式のようになる。

$$\text{単位固相質量あたりの(固相+液相)の体積} = \frac{V_s}{W_s} + \frac{V_w}{W_s} = \frac{1}{G_s \gamma_w} + \frac{w}{\gamma_w} \quad (4-6)$$

ここで、気相の変化は(4-2)式を変形し(4-7)と表される。() で括られた右辺第 2 項は(4-7)であり、含水比変化だけから決まる直線で表れられるので、図 4.5-5 に示す整理により単位固相当たりの全体積をプロットすればグラフ上から得られることになる。

$$\text{単位固相当たりの気相体積} \quad \frac{V_A}{W_s} = \frac{V}{W_s} - \left(\frac{V_s}{W_s} + \frac{V_w}{W_s} \right) \quad (4-7)$$

(3) 乾燥条件が異なる場合の乾燥に伴う空隙変化

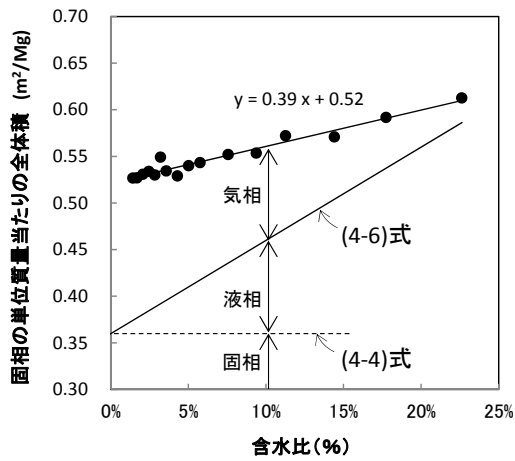
図 4.5-7 に、単位固相質量あたりの全体積の変化を示す。図 4.5-1 に示した乾燥実験の結果の乾燥密度を(4-6)式を用いて変換し、縦軸に示したものである。図には、(4-10)式で計算される単位固相質量あたりの固相と液相の体積の変化を直線で示した。また、図 4.5-7(a)のみには補足的に、固相、液相、気相の説明を示した。計算にあたって固相の比重としては 2.77 を使い、水の単位体積質量は 1.0Mg/m³ とした。

図 4.5-7 でベントナイトペレットから水分が失われたときの、固相、液相、気相、それぞれの変化が、異なる乾燥条件で実施したケース毎に確認できる。乾燥の初期の状態は、

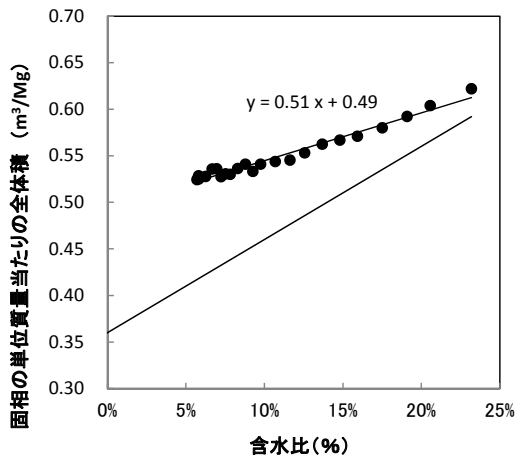
すでに説明したように飽和度 90%程度であり、若干の気相が存在しており、図 4.5-5 で示した理想的な粘性土の初期状態とは異なる。

乾燥にともなう乾燥密度の増加が小さかった 110°C で乾燥させたケース 1 では、気相の増加が大きく、乾燥密度の増加が大きかった常温で乾燥したケース 3 やケース 5 は、気相の増加が小さい。このうち、常温で乾燥したケース 3 とケース 5 では、全体積の変化を直線で近似すれば、固相と液相の合計の変化を示した直線にほぼ平行に近い状態となっており、乾燥による空気の浸入が非常に少ないと言える。つまり、今回の常温で乾燥したケースは、一様にゆっくりと乾燥させたことに該当すると考えられ、これ以上、ゆっくり乾燥させることによる乾燥密度の増加はあまり期待できないと考えられる。

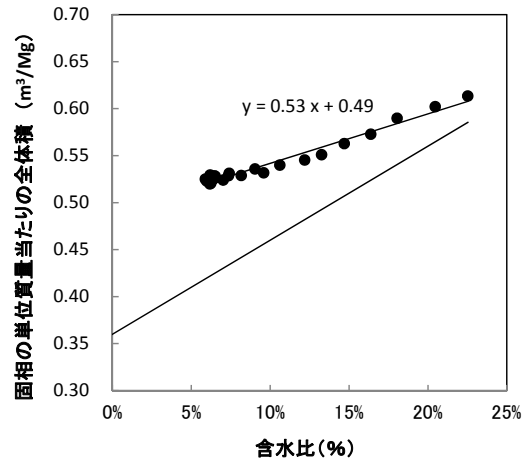
また、図 4.5-5 に示した一般的な飽和粘性土の挙動では、ある限界含水比より小さい領域では乾燥収縮が生じないとされていたが、ベントナイトペレットの場合は、これと異なる挙動を示すことが図 4.5-7 からわかる。含水比が 0% に近い状態の付近でも、含水比が低下すれば乾燥収縮が生じており、乾燥収縮が起きない領域は確認できなかった。このことは、含水比 0% 付近まで乾燥したケース 1 およびケース 5 の 2 段階目の乾燥実験の結果から確認できる。特に、ケース 5 での 2 段階目では、含水比 10% から 110°C で乾燥しており、この区間で明らかに乾燥収縮が生じている。このような現象はベントナイトの特徴に起因していると考えられる。ベントナイトでは含水比が低い状態でも主要鉱物であるモンモリロナイトの層間に水が残っており、これは接触していない粒子が残っていると考えられ、この層間水が乾燥によって喪失することで層間が狭まり、結果的にベントナイトペレットとしての体積縮小を起こすためと考えられる。



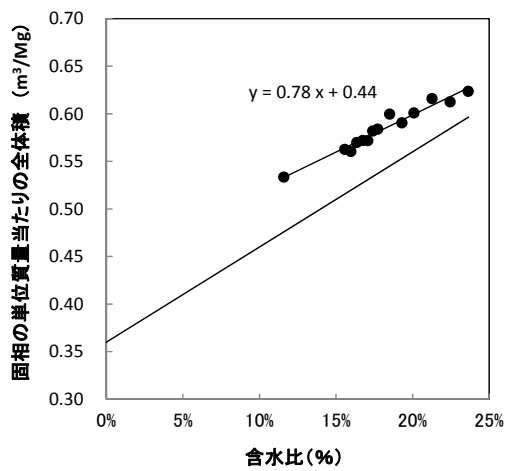
(a) ケース 1 : 0.55m/s, 110°C



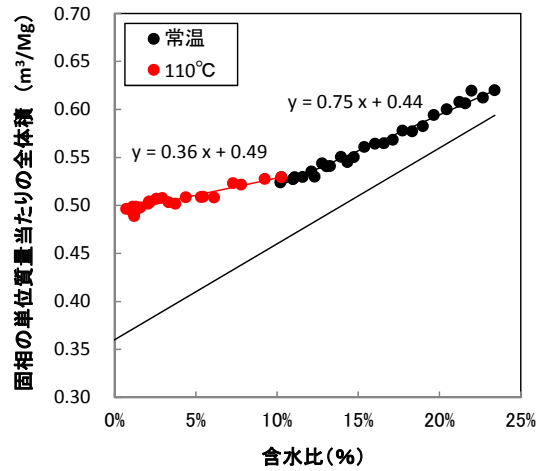
(b) ケース 2 : 0.55m/s, 60°C



(d) ケース 4 : 0.20m/s, 60°C



(c) ケース 3 : 0.55m/s, 常温



(e) ケース 5 : 0.20m/s, 常温→110°C

図 4.5-7 含水比変化にともなうベントナイトペレットの体積変化

4.6 4章の結論

湿潤状態のベントナイトペレットを回転型送風乾燥機を用いて、温度や風速が異なる条件で乾燥し、乾燥途中のペレットの含水比の変化や乾燥密度の変化を測定することによって、以下のことがわかった。

- (1) 乾燥温度が低いほうが、また風速が小さいほうが、ベントナイトペレットの乾燥が速く進む、すなわち含水比の低下速度が速いことを確認した。
- (2) 乾燥温度 110°C で 24 時間以上炉乾燥したときの含水比を完全乾燥状態（含水比 0%）と定義すると、乾燥温度が低い場合は完全乾燥状態になる前に含水比が収束し、その収束値は乾燥温度 60°C では 6%程度、乾燥温度が常温（22～38°C）では 10～12%程度と、乾燥温度が低いほうが収束含水比が高いことがわかった。また、収束含水比は風速には依存しないことが推測された。
- (3) 乾燥によって含水比が低下すると同時に乾燥密度が増加することが認められ、この含水比と乾燥密度の関係は、ほぼ直線関係を示すことがわかった。直線の傾き、すなわち含水比低下に対する乾燥密度増加を乾燥密度増加指数と定義すると、乾燥温度が違えば乾燥密度増加指数が異なることが明らかになった。乾燥温度が低いほうが乾燥密度増加指数が大きく、密度増加指数が大きければ含水比の低下が良好に乾燥収縮に反映されること示している。
- (4) 乾燥によるベントナイトペレットの乾燥密度増加は、ベントナイトの乾燥収縮現象と捉えることができるが、これには一般的な土で説明されているような、完全乾燥に近い含水比状態における乾燥収縮しない領域は存在せず、完全乾燥状態の近傍でも含水比の低下が乾燥収縮に寄与することが明らかになった。これは、一般的な土では含水比が小さくなると粒子が接触した状態になり、ここから含水比をさらに低下させても体積変化が生じないのに対して、ベントナイトでは含水比が小さい状態でもモンモリロナイトの層間に水が残っており、これは接触していない粒子が残っていると考えられ、この層間水が喪失することで層間が狭まり、全体としての体積縮小を起こすためと考えられる。
- (5) 含水比の低下が乾燥収縮につながることは、水が失われた空間に空気が浸入せずに消滅することを示している。このため、含水比の低下と空気量増加の関係を考察することで乾燥収縮により実現できるベントナイトペレットの最大乾燥密度を考察したと

ころ、常温で乾燥した場合には最大値に近い乾燥収縮が起きており、ほぼ最善に近い乾燥方法であったことを示した。例えば、乾燥空気の湿度を高めたり、風速を極度に遅くすることなどで、さらにゆっくりとした乾燥を行っても、乾燥密度の増加は限定されていると考えられる。

以上の、結論を踏まえて、ベントナイトペレットを製造する場合の知見をまとめると次のようになる。

- (1) ベントナイトペレットを乾燥収縮させて高密度な状態に製造する場合には、乾燥初期にはゆっくり水分低下するように常温で適切な風速で乾燥させることがよい。これによりベントナイトペレットは良好な乾燥収縮を起こし、最大に近い状態に乾燥密度が高まる。
- (2) 常温では含水比 10%程度で水分低下が止まるが、温度を上げてさらに乾燥すれば、水分を低下が起き乾燥収縮が進む。
- (3) 水分低下にともなう乾燥収縮はベントナイトの場合、含水比 0%になるまで続くので、最終的には、完全収縮状態になるまで乾燥させることで密度が高い製品が製造できる。

参考文献

- 1) 中島均, 齊藤亮: 乾燥収縮を利用したベントナイトペレットの製造方法における乾燥条件の検討, 第 49 回地盤工学研究発表会 発表講演集, pp.341-342, 2014.
- 2) 中島均, 齊藤亮: 湿潤ベントナイトペレットの 2 段階乾燥実験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.41-42, 2014.
- 3) 土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎, 森北出版, pp.98-101, 1979.
- 4) 中村正秋, 立元雄治: 第 2 版 初歩から学ぶ乾燥技術 —基礎と実践—, 丸善出版, pp.2-59, 2013.
- 5) 株式会社クメタ製作所: 回転型乾燥機 (RLD/RD Rotary Dryer Series) パンフレット, 2013.

第5章 小型容器を用いたベントナイトペレットの充てん実験

5.1 はじめに

本章では、ベントナイトペレットの充てん実験を行い、すき間充てん性能を検討した^{1),2)}。使用した充てん材料は、第3章で述べた新たな方法で製造したベントナイトペレットである。透水係数などのすき間部の性能は乾燥密度に依存するために、すき間の充てん性能は、所定の空間に充てんできるベントナイトの重量、すなわち充てん密度で示した。

充てん実験では、大きさの異なるベントナイトペレットを5種類用意し、これらを単独で用いるだけでなく、混合する場合も実施し、最適な組み合わせや混合条件などを検討した。充てん容器には小型の円筒形容器を用いた。なお、充てん密度の目標値は 1.37Mg/m^3 とした。

5.2 節では、充てん材料であるベントナイトペレットの諸元や充てん容器について述べた。

5.3 節～5.5 節の3つの節で、3種類の充てん実験を順番に示した。5.3 節がペレット単独の充てん実験、5.4 節が2粒径混合ペレットの充てん実験、5.5 節が3粒径混合ペレットの充てん実験である。

5.6 節では、充てん密度が最も高くなった2粒径混合ペレットについて、ペレットの組み合わせが充てん密度に与える影響について考察を行った。

5.7 節では、充てん実験で得られた結果を、既存の充てん理論などの知見と比較し、考察を行った。

5.2 ベントナイトペレットと充てん容器

5.2.1 ベントナイトペレット

充てん実験に使用したベントナイトペレットは、異なる押出し径で製造した5種類のベントナイトペレットである。押出し径は1mm、2mm、4mm、15mm、20mmであり、本章ではペレットの種類を押出し径で表示した。

図 5.2-1 に篩分けにより測定した各ペレットの粒度分布を示す。実際の粒径は押出し径よりも若干大きい。粒径のバラツキは小さく、概ね単粒径であることがわかる。

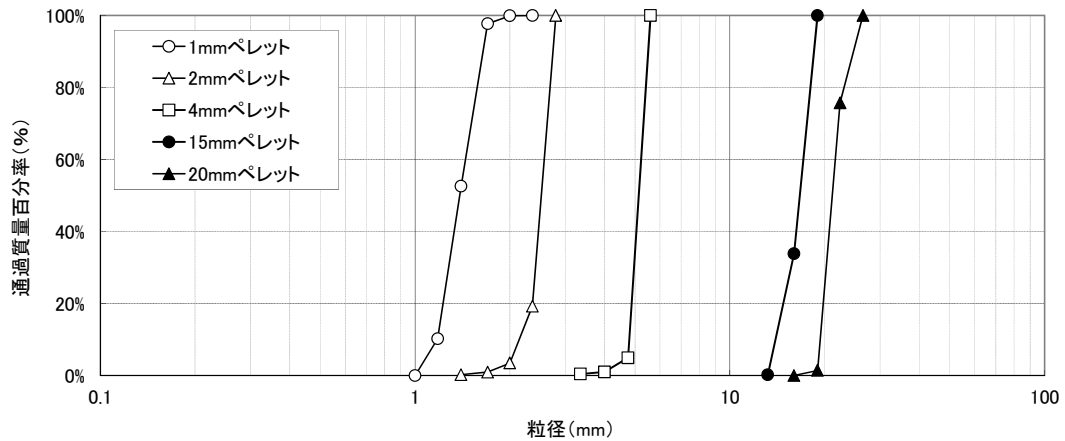


図 5.2-1 充てん実験に使用したベントナイトペレットの粒度分布

表 5.2-1 に製造したペレットの単体密度の測定結果を示す。各ペレットから粒径範囲の中央値付近のペレットを採取し、水中懸垂法により測定した。水中懸垂法はペレットの容積を水中に沈めたときの浮力より求め、これでペレットの質量を除してペレットの単体密度を求める方法である。ペレットは 110℃の炉乾燥で完全乾燥状態にしており、得られた単体密度は乾燥密度である。

表 5.2-1 充てん実験に使用したベントナイトペレットの単体乾燥密度

呼び名	押し径 (mm)	単体乾燥密度 (Mg/m ³)
1mm ペレット	1	2.16
2mm ペレット	2	2.10
4mm ペレット	4	2.04
15mm ペレット	15	1.97
20mm ペレット	20	2.00

5.2.2 充てん容器

充てん密度は、充てん空間の大きさによっても変わることも予想されるが、緩衝材周囲のすき間は数 cm～数 10cm 程度の幅となることが予測されるので、充てん容器として図 5.2-2 に示す直径 100mm、高さ 127mm の円筒形の金属モールドを用いた。モールドの容積は 1,000 cm³である。



図 5.2-2 充てん実験に用いた小型容器

5.3 ペレット単独の充てん実験

5.3.1 実験ケース

粒径の異なる5種類のペレットを、それぞれ単独で用いて充てん実験を行った。

5.3.2 実験方法

モールド直上よりスコップを用いて、モールド内にペレットを充てんした。モールドに振動は与えなかった。モールド上部に盛り上がるまでペレットを充てんし、ストレートエッジを用いてモールド上部の位置で摺り切り、充てん完了とした。充てんできたペレットの重量を計測し、充てん密度を求めた。

5.3.3 実験結果と考察

図 5.3-1 に実験結果を示す。5種類のペレットのいずれも、目標とする充てん密度 1.37Mg/m^3 を満足することができなかった。最も充てん密度が高い1mmペレットでも充てん密度は 1.3Mg/m^3 程度であった。

また、ペレット毎に充てん密度が異なり、粒径の小さいペレットは充てん密度が高く、粒径の大きいペレットは低い結果となった。この理由として2つが考えられる。1つはペレットの単体の密度の違いによるものである。粒径の小さいペレットのほうが表 5.2-1 で示したように単体密度が高いため、充てん密度が高くなったと考えられる。

もう一つとして、15mmペレットや20mmペレットのような粒径の大きいペレットでは、容器が十分な大きさでなかった可能性が高い。容器の境界部分ではペレットの配置がくずれ、内部よりも充てん密度が低くなるため、粒径の大きいペレットでは容器全体の平均的な値として示される充てん密度が低くなったと考えられる。十分な大きさの容器を使えば、今回得られたよりも高い充てん密度が得られることも予測できるが、すき間充てんを対象とした検討においては、これよりも大きい容器で充てん

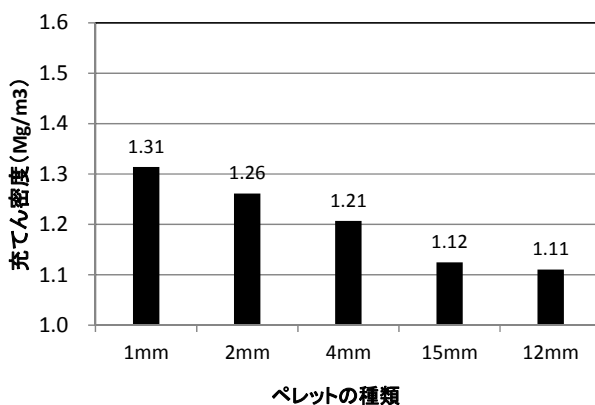


図 5.3-1 各粒径のベントナイトペレットの充てん密度

密度を得ることの意味は小さいと思われる。

5.4 2粒径混合ペレットの充てん実験

5.4.1 実験ケース

粒径の異なる2種類のペレットを混合した場合の充てん密度を、ペレットの組み合わせと混合割合を変えて取得した。表 5.4-1 に実験ケースを示す。

混合するペレットの組み合わせは、5種類のペレットを粒径の大きいペレット（大ペレットと呼ぶ）と粒径の小さいペレット（小ペレットと呼ぶ）の2つに便宜上分類し、大ペレットと小ペレットを組み合わせることとした。今回の実験では15mmペレット、20mmペレットの2種類を大ペレットとして扱い、1mmペレット、2mmペレット、4mmペレットの3種類を小ペレットとして扱った。したがって、充てん実験を行った組み合わせは6通りである。

また、混合割合はすべての組み合わせにおいて、小ペレットの重量割合で、20%、30%、40%、50%、60%、80%の6条件とした。

表 5.4-1 実験ケース（2粒径混合ペレットの充てん実験）

組み合わせ		小ペレット充てん割合
小ペレット	大ペレット	
1mm	15mm	20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80%
2mm	15mm	
4mm	15mm	
1mm	20mm	
2mm	20mm	
4mm	20mm	

5.4.2 実験方法

2粒径混合ペレットの充てん方法として、図 5.4-1 に示すように、大ペレットをモールド内に手で均等に配置し、その上から小ペレットを高さ 5cm の位置から均等に自由落下させ、これを繰り返すことでモールド全体が 5層で詰まる方法（5層交互投入法）を用いた。図 5.4-2 に充てん状況の一例を示す。

この充てん方法は、事前に混合したペレットを投入する方法に比べて、モールド内での

材料の分離が少なく均質な充てんができるため、安定的に高い充てん密度が得られ、理想に近い値が得られると考えた。なお、より高い充てん密度を得る方法としてモールドに振動を与えることが考えられたが、その場合には小ペレットがモールド底部に沈みこみ、モールド上部より大ペレットがはみ出すため、結果的には充てん密度が低下することを事前に確認してある。

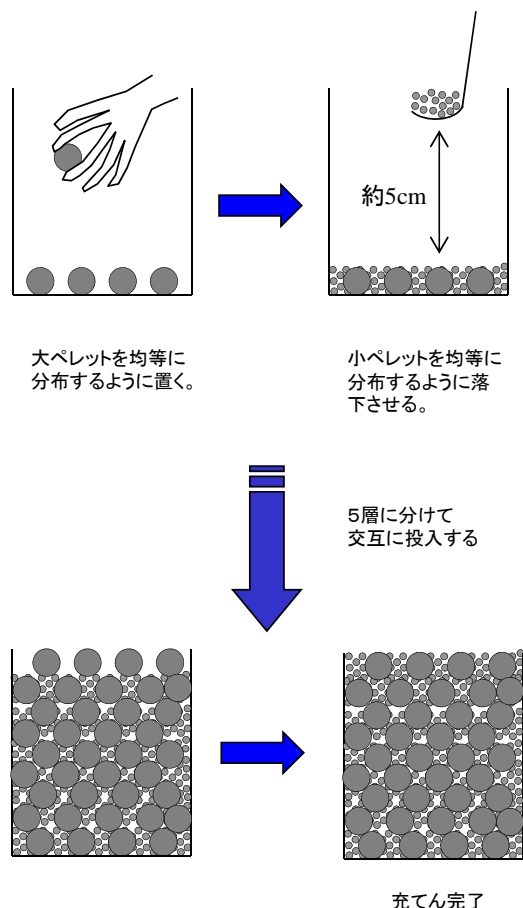


図 5.4-1 2粒径混合ペレットの充てん方法（5層交互投入法）

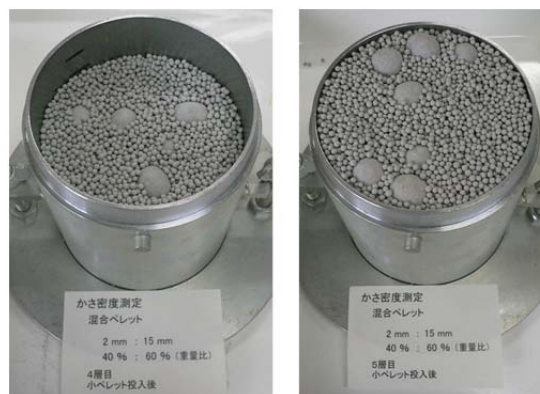


図 5.4-2 2粒径混合ペレットの充てん実験における充てん状況

5.4.3 実験結果と考察

図 5.4-3～図 5.4-5 に2粒径混合ペレットの充てん実験で得られた充てん密度を示す。ペレットの組み合わせは6通りであるが、小ペレットが同じ組み合わせを1つのグラフにまとめた。各グラフの横軸は混合割合を示しており、小ペレットの割合を指標として用いた。横軸が0%と100%の位置には、ペレット単独の充てん実験で得られた充てん密度を示した。0%の位置が大ペレットのみの充てん密度で、100%の位置が小ペレットのみの充てん密度である。

まずはじめに、大ペレットと小ペレットを混合すると、各ペレットを単独で充てんした場合に比べ、充てん密度が高まることがわかる。すべての組み合わせで同じ傾向である。また、混合割合の違いで充てん密度が異なり、2種類のペレットを同量程度混合した場合に充てん密度が高くなる傾向を示す。例えば、図 5.4-3 に示す 20mm ペレットと 1mm ペレットの組み合わせでは、1mm ペレットの割合が 40%で明瞭に最大の充てん密度が得られることが確認できる。図 5.4-5 の 15mm ペレットと 4mm ペレットでは、明瞭なピークは確認できないが、混合割合が 40~60%で最大の充てん密度が得られている。

次に、組み合わせの違いが充てん密度に影響することがわかる。小ペレットの種類に着目すると、図 5.4-3 に示す 1mm ペレットの場合が最も高く最大で 1.54Mg/m³であり、図 5.4-5 に示す 4mm ペレットの場合が 1.25~1.30Mg/m³と低い。小ペレットの粒径が小さいほど 2 粒径混合ペレットの充てん密度が高まる。同様に大ペレットの種類に着目すると、小ペレット

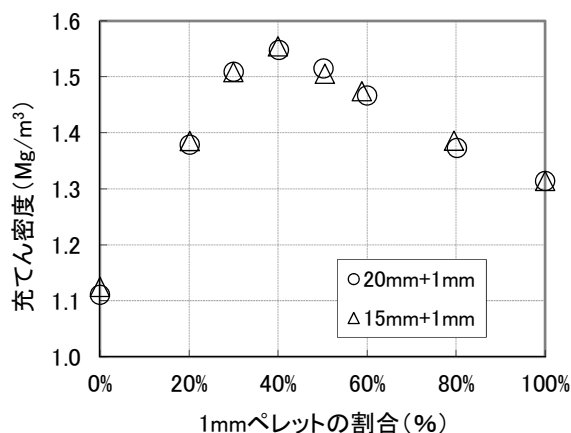


図 5.4-3 小ペレットに 1mm ペレットを用いた場合の 2 粒径混合ペレットの充てん密度

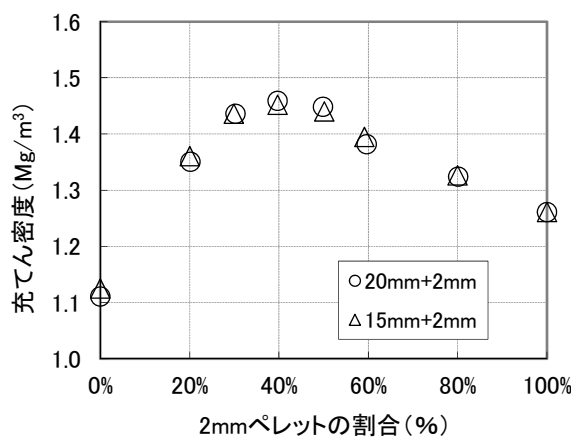


図 5.4-4 小ペレットに 2mm ペレットを用いた場合の 2 粒径混合ペレットの充てん密度

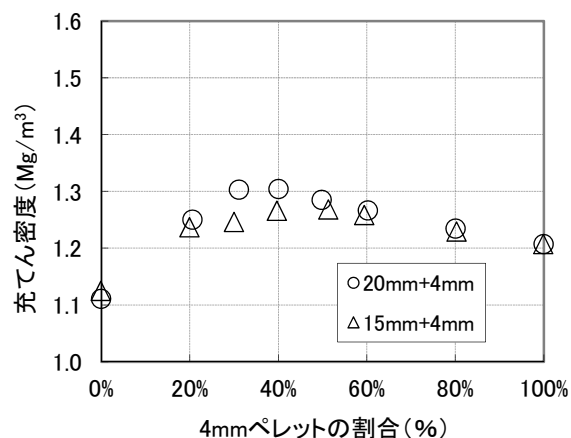


図 5.4-5 小ペレットに 4mm ペレットを用いた場合の 2 粒径混合ペレットの充てん密度

が 1mm ペレットの場合 (図 5.4-3) と 2mm ペレットの場合 (図 5.4-4) は、大ペレットの粒径によらず最大充てん密度がほぼ同等であるが、小ペレットが 4mm ペレットの場合 (図 5.4-5) は大ペレットとして 20mm ペレットを用いた方が、15mm ペレットを用いた場合に比べて充てん密度が高い。大ペレットの粒径は大きいほど、2 粒径混合ペレットの充てん密度は高くなる傾向があると考えられる。これらから、大ペレットと小ペレットの粒径の差が大きいほうが、2 粒径混合ペレットの充てん密度が高まると言える。

本実験で対象としたベントナイトペレットを用いて 2 粒径混合ペレットを作る場合、20mm ペレットと 1mm ペレットを重量比で 60:40 に混合した条件が、充てん密度 1.54Mg/m^3 と最も高かった。

5.5 3 粒径混合ペレットの充てん実験

5.5.1 実験ケース

単粒径のペレットを単独で用いるよりも 2 粒径混合ペレットのほうが高い充てん密度が得られたことから、さらに 3 粒径以上の混合効果の見通しを得るために、3 粒径混合ペレットの充てん実験を行った。

3 粒径混合ペレットの充てん実験では、ペレットの組み合わせは 1 通りで、混合割合のみを変えて実施した。

ペレットの組み合わせは、20mm ペレット、4mm ペレット、1mm ペレットとした。2 粒径混合ペレットで最も充てん密度が高かった組み合わせは、前述するように 20mm ペレットと 1mm ペレットである。これに中間の粒径のペレットとして 4mm ペレットを加えた組み合わせである。

混合割合については、3 種類のペレットを個別に設定するのではなく、表 5.5-1 に示すように 2 つの段階に分けて充てん実験を行った。第 1 段階では、4mm ペレットと 1mm ペレットの最適な混合割合を充てん実験で求めた。混合割合は 20%、30%、40%、50%、60% の 5 条件とした。第 2 段階では、第 1 段階で求めた最適割合の 4mm と 1mm の混合ペレットを小ペレットとして扱い、大ペレットとして 20mm ペレットを混合した材料で、充てん実験を行った。混合割合は 20%、40%、60% の 3 条件とした。

表 5.5-1 実験ケース（3粒径混合ペレットの充てん実験）

実験の順序	組み合わせ		小ペレットの混合割合 (重量比)
	大ペレット	小ペレット	
第1段階	4mm	1mm	20%, 30%, 40%, 50%, 60%
第2段階	20mm	4mm+1mm	20%, 40%, 60%

5.5.2 実験方法

充てん方法は、2段階の充てん実験で異なる方法を用いた。第1段階の4mmと1mmの混合ペレットの充てん実験では、事前混合法を用いた。すなわち、4mmペレットと1mmペレットを事前に所定割合で混合した材料を、ペレット単独の充てん実験と同様に、モールド上部より静かに投入する方法を用いた。第2段階の充てん実験は、2粒径混合ペレットの充てん実験と同様に5層交互投入法で行った。20mmペレットが大ペレットに、事前に最適割合で混合した4mmと1mmの混合ペレットが小ペレットに対応する。

5.5.3 実験結果と考察

図 5.5-1 に第1段階の4mmと1mmの混合ペレットの実験結果を示す。横軸は1mmペレットの混合割合で、0%と100%のプロットはペレット単独の充てん実験の結果である。4mmペレットと1mmペレットの2粒径混合ペレットにおいても、ペレットを単体で用いる場合より高い充てん密度が得られる。充てん密度が高まる混合割合は1mmペレットが40~60%程度と幅があるが、実験のバラツキによるものと考えられるため、第2段階の充てん実験で用いる混合割合は50%を設定した。

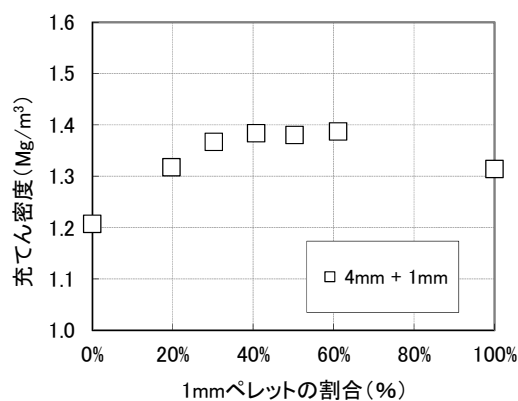


図 5.5-1 1mmペレットと4mmペレットの混合した場合の充てん密度

図 5.5-2 に第2段階の4mmと1mmの混合ペレットに20mmペレットを混合した3粒径混合ペレットの実験結果を示す。横軸には小ペレットとして扱った4mmと1mmの混合

ペレットの、3粒径混合ペレット全体に対する重量割合を示した。なお、4mmと1mmの混合割合は前述したように50%である。グラフ中でプロットの近傍に示した①～⑤の数字はケース番号を示しており、グラフ上部には対応するケースの3種類のペレットの混合割合を併記した。

図 5.5-2 より、3粒径混合ペレットにおいても、大ペレット（20mm ペレット）と小ペレット（4mm・1mm 混合ペレット）が同量程度に混合した場合に充てん密度が高くなることがわかる。しかし、充てん密度の最大値は、③のケース（20mm：60%，4mm：20%，1mm：20%）で得られた $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ であり、図 5.4-3 で示した小ペレットに 1mm ペレットを用いた 2 粒径混合ペレットでの最大値 $1.54\text{Mg}/\text{m}^3$ よりも若干小さい。3 粒径を混合するために中間粒径として 4mm を混合することで、逆に充てん密度の向上を阻害する結果となった。このことから 3 粒径以上のペレットを混合しても大幅な密度増加は期待できないものと思われる。

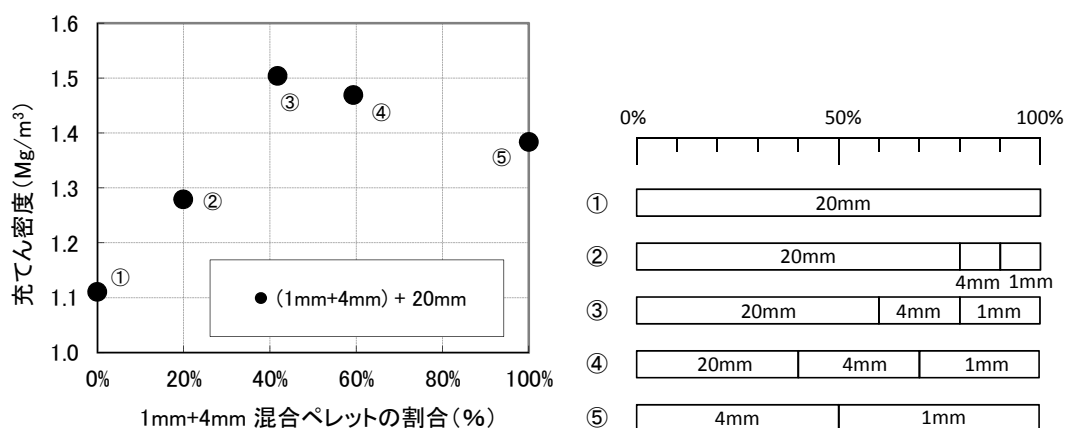


図 5.5-2 3 粒径混合ペレットの充てん密度

5.6 2 粒径混合ペレットの充てん性能に関する考察

粒径の異なる 2 種類のベントナイトペレットを混合することが、充てん密度を高めるために有効であることが充てん実験で明らかになった。混合割合が 40～60%程度で最大充てん密度が得られ、最大充てん密度の値はペレットの組み合わせによって変わる。粒径の差が大きいペレットを組み合わせるほど、最大充てん密度が大きくなるが、ここでは新たな指標を導入することで、ペレットの組み合わせと最大充てん密度との関係を定量的に考察した。

5.6.1 充てん密度と粒径比の関係

粒径の違いを定量的に表現する指標として式(5-1)に示す粒径比を用いる。それぞれのペレットは図 5.2-1 に示すように、ほぼ単粒径であるが粒径に若干のバラツキを有しているため、粒径の代表値として 50%通過粒径を用いた。

表 5.6-1 は図 5.2-1 より求めた 50%通過粒径を示している。

粒径比の計算例を示すと、1mm ペレットの 50%通過粒径は 1.4mm で、20mm ペレットの 50%通過粒径は 21.0mm であるため、1mm ペレットと 20mm ペレットの粒径比は 15.0 となる。

表 5.6-1 ペレットの 50%通過粒径

呼び名	50%通過粒径 (mm)
1mm ペレット	1.4
2mm ペレット	2.5
4mm ペレット	5.1
15mm ペレット	17.0
20mm ペレット	21.0

$$\text{粒径比} = \frac{\text{大ペレットの50\%通過粒径}}{\text{小ペレットの50\%通過粒径}} \quad (5-1)$$

図 5.6-1 は、充てん実験で実施したすべての組み合わせの 2 粒径混合ペレットについて粒径比を計算し、これと最大充てん密度との関係を示したものである。最大充てん密度には、混合割合を変えて取得した充てん密度の中で最も高い値を用いた。混合割合が 40~60% の範囲で得られている。凡例からわかるように、グラフは

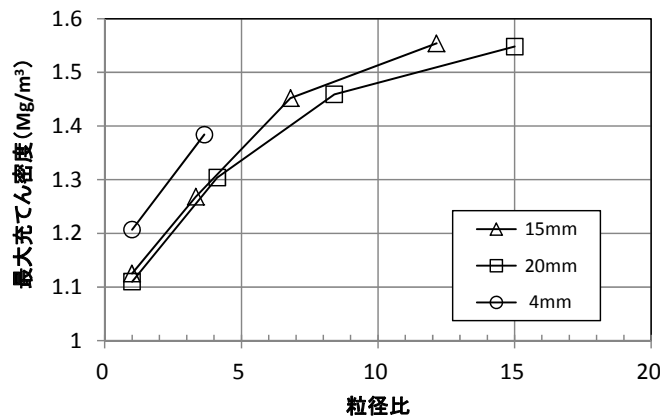


図 5.6-1 粒径比と最大充てん密度の関係

大ペレットの種類で系列化している。例えば、大ペレットが 20mm ペレットの系列では、1mm ペレットとの混合は粒径比 15.0 の位置に、2mm ペレットとの混合は粒径比 8.4 に、4mm ペレットとの混合は粒径比 4.1 にプロットした。加えて粒径比が 1.0 の位置には 20mm ペレットのペレット単独の充てん実験の結果をプロットした。

図 5.6-1 から、ペレットの組み合わせ毎に決まる粒径比と最大充てん密度の関係が確認できる。粒径比の大きいペレットの組み合わせを選択することで、最大充てん密度を高めることができる。しかし、その関係は線形ではなく、粒径比が大きくなるにつれて最大充てん密度が増加する効果は小さくなる。すなわち、今回の実験で使用したペレットより粒径が大きいペレットや小さいペレットを用いて、粒径比が大きい2粒径混合ペレットであっても、充てん密度が向上する効果は小さいと予想できる。

5.6.2 充てん率と粒径比の関係

ここまでは、充てん性の指標として充てん密度を用いて議論した。充てん密度は充てん空間に充てんされたベントナイトの重量であり、充てん後のすき間部の性能を評価する観点では適切な指標である。ベントナイト系材料の性能である低透水性や膨潤性は乾燥密度に依存するからである。

しかし、空間へのペレットの充てんは基本的に配置問題であり、すき間の容積に占めるペレットの容積で整理するほうが説明しやすい。すなわち、同じ配置でペレットが充てんされても、ペレットの密度が高ければ充てん密度は高くなる。このような指標としてここでは充てん率を用いて整理

した。なお、ペレットが充てんされたときのすき間の状態は図 5.6-2 に示すとおりであり、充てん密度および充てん率は、それぞれ式(5-2)、式(5-3)のようになる。

最大充てん密度が得られたときの充てん率を最大充てん率として、粒径比との関係を整理すると図 5.6-3 が得られる。すべてのデータでほぼ同一の曲線を示すことがわかる。すなわち、今回使用した形状のベント

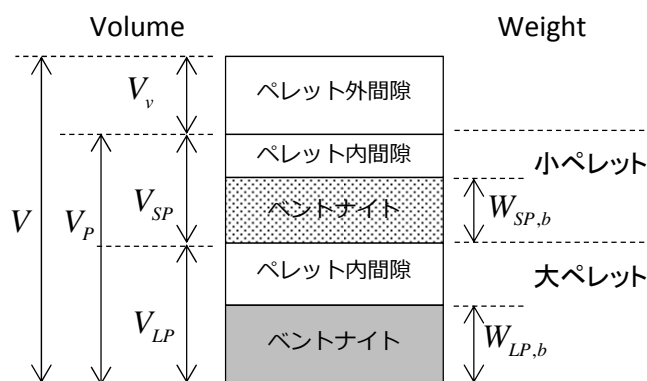


図 5.6-2 ペレットと空隙の状態図

$$\text{充てん密度} = \frac{W_{SP,b} + W_{LP,b}}{V} \quad (5-2)$$

$$\text{充てん率} = \frac{V_{SP} + V_{LP}}{V} \quad (5-3)$$

ナイトペレットは、どの2粒径を混合しても、その粒径比で図 5.6-3 から最大充てん率が決まり、これにペレット単体の密度を加味すると最大充てん密度が推測できると考えられる。

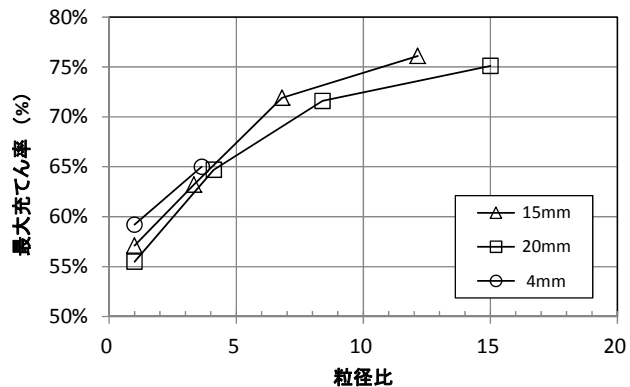
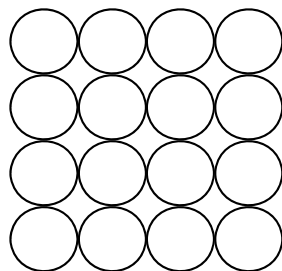


図 5.6-3 2粒径混合ペレットにおける粒径比と最大充てん密度の関係

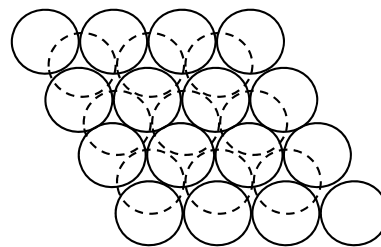
5.7 他の充てん理論との比較に関する考察

5.7.1 等球粒子の充てん理論

大きさの等しい球形粒子（等球粒子）が、粒子の大きさに比べて十分大きい空間を規則的に充てんすることを考えると、配列の仕方によって6種類の充てん構造があることはよく知られている³⁾。それぞれの充てん構造ごとに球の直径には無関係に充てん率が決まり、充てん率は幾何的に計算できる。図 5.7-1 は、この規則的な充てん構造のうち充てん率が最大および最小となる構造を模式的に示したものである。図 5.7-1(a)に示す立方充てん構造が最小の充てん率 52.36%を示し、図 5.7-1(b)の六方最密充てん構造が最大の充てん率 74.06%を示す。六方最密充てんより大きい充てん率となることは理論上ありえず、立方充てんより小さい充てん率では等球粒子が接触していない分散系になる。その他の4種類の充てん構造では、立方充てん構造と六方最密充てん構造の間に充てん率の値をとる。例えば、正斜方充てん構造では充てん率 60.46%を示す⁴⁾。



(a) 立方充てん



(b) 六方最密充てん

図 5.7-1 大きさの等しい球形粒子の規則充てん構造

本章の充てん実験に用いたベントナイトペレットを等球粒子と考えると、充てん構造の違いによらず、粒子密度に充てん率を乗ずることで充てん密度が得られる。粒子密度を 2.0Mg/m^3 と仮定すると、六方最密充てん構造は充てん率が 74.06% なので充てん密度は 1.48Mg/m^3 となる。一方、立方充てん構造は充てん率が 52.36% で充てん密度は 1.05Mg/m^3 となる。すなわち、単独ペレットの充てん実験において六方最密充てん構造が形成されていれば、目標の充てん密度である 1.37Mg/m^3 を十分に満足できる。

図 5.7-2 は、5.3 節に示した単独ペレットの充てん実験の結果（図 5.3-1 参照）から充てん率を求め、充てん率と充てん密度の関係を示したものである。黒い直線は、ペレットの単体密度を 2.0Mg/m^3 とした場合の充てん密度と充てん率の関係である。直線の両端は、最大と最小の充てん率を示す六方最密充てん構造と立方充てん構造を示す。図より、今回使用したベントナイトペレットの充てん構造は、六方最密充てん構造になっていないことが推察される。粒径の小さい 1mm ペレット、 2mm ペレット、 4mm ペレットでは、ペレットの大きさに比べて充てん容器は十分大きいと考えられるが、充てん構造としては六方最密充てん構造と立方充てんが示す充てん率のほぼ中間に位置している。実際の粒子を充てんした場合には、空間全域にわたって同じ種類の充てん構造をとることはなく、局所的に異なる充てん構造をとる。一方、粒径の大きい 15mm ペレットと 20mm ペレットでは、立方充てん構造に近い充てん率を示している。これは、充てん容器の大きさに比べてペレットの大きさが大きいことから、充てん率が小さくなったものと考えられる。

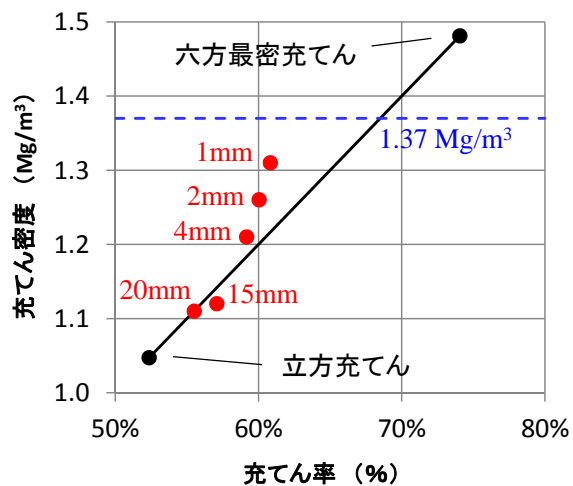


図 5.7-2 単独ペレット充てん実験で得られた充てん率と充てん密度

5.7.2 大きさの異なる球形粒子が混在する場合の充てん理論

大きさの異なる球形粒子を適切に組み合わせれば、等球形粒子を充てんする場合に比べて充てん率を高めることができる。このような高い充てん率が得られる充てん構造として、

Horsfield の充てん模型が有名である^{3),5)}。

基本的な考え方は図 5.7-3 に示すように、等球粒子（1次球）が規則的な配置構造を構成し、それによって作られる空隙に収まる最大の二等球粒子（2次球）を配置すると、1次球のみの場合に比べて充てん率が増加するというものである。2次球まで配置した後も空隙は存在しており、そこにも適切な大きさの等球粒子（3次球）を配置すると、さらに充てん率が

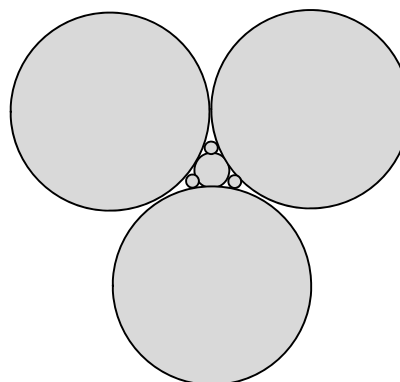


図 5.7-3 大きさの異なる球形粒子の充てんの考え方

増加する。4次球、5次球と適切な大きさの等球粒子を配置していけば、ますます充てん密度が増加する。

表 5.7-1 に示すように Horsfield の充てん模型では、1次球の配置は六方最密充てん構造である。六方最密充てん構造には、大きさと形状が異なる2種類の空隙が存在する。1つは正八面体形状であり、ここには2次球が配置される。もう一つは正四面体構造であり、ここには3次球が配置される。2次球だけを配置した場合には充てん率が79.3%を示し、3次球まで配置すると81.0%の充てん率となる。

表 5.7-1 Horsfield の充てん模型

	球の半径	個数比	重量比	充てん率	
1次球	r	1	100.0%	74.1%	六方最密充てん
2次球	$0.414r$	1	7.1%	79.3%	
3次球	$0.225r$	2	2.3%	81.0%	
4次球	$0.117r$	8	1.3%	84.2%	
5次球	$0.116r$	8	1.2%	85.1%	

本章で示した充てん実験に使用した最も大きいペレットは20mmペレットである。等球粒子と考え、直径を50%通過粒径の21mmとする。20mmペレットをHorsfieldの充てん模型の1次球と考えれば、2次球として8.7mmのペレット、3次球として4.7mmを用い、それぞれの重量比を1:0.071:0.023にすれば、HorsFieldの充てん構造を作ることができる。しかし、5.7.1項で示したように1次球である20mmペレットを用いたペレット単独の充てん実験の結果からは、充てん領域全体で六方最密充てん構造となっているとは考えら

れなかった。

Horsfield の充てん模型と同様の考え方で、1次球が六方最密充てん構造ではなく、立方充てん構造になる場合を仮定すると、2次球の大きさは、1次球の半径を r として $0.73r$ となる。1次球と2次球の個数比は1：1であるが、2次球の大きさがHorsfieldの充てん模型とは異なるため、重量比は100%：38.9%となる。このように、1次球の充てん構造が異なれば、そのすき間を充てんするために最適な2次球の大きさも量も異なる。

先に考察したように、今回使用したベントナイトペレットでは、大きいペレットが一様で規則的な充てん構造を形成しているとは考えられず、すき間の形状や大きさも局所的に異なるので、Horsfieldの充てん模型のような考え方、すなわち大きい粒子に小さい粒子を混在させることで充てん率が高まる考え方で理論的な考察を行うことは、定性的には可能であっても定量的には難しいと考えられる。

2粒径混合ペレットの充てん実験の結果は、大ペレットを1次球、小ペレットを2次球と考えれば、2次球が小さいほど充てん率が高まることを示している。1次球が作る空隙が不規則なために、その空隙に過不足なく収まる2次球の粒径も一定ではなく、結果的に2次球として等球粒子を用いる今回の実験のような場合は、2次球の粒径が小さいほど高い充てん率が得られたと考えられる。

同様のことを、鈴木らは、ガラスビーズを用いた充てん実験結果として示している⁶⁾。0.088～1.0mmのガラスビーズを9段階に分級し、等球粒子を作製し、大きさの異なる等球粒子を2種類混合し、内径50.5mm、深さ50mmの充てん容器に、タッピングもしくは棒突きで充てんすると粒径比が大きいほど、充てん密度が高まることを示している。

5.7.3 粒度分布の形状の違い

土質材料の締固めの問題やコンクリートの骨材の問題などでは、材料の粒度分布が広い材料の方が高い密度が得られると考えられている⁷⁾。図5.7-4に粒度分布の例を示す。Aは粒度分布が狭く、Bは粒度分布が広い。AよりもBのほうが高密度を実現できる。

本章で示した充てん実験における2粒径混合ペレットを、粒度分布の観点でとらえるとCのような形状になる。粒度分布の範囲という視点では、大ペレットと小ペレットの粒径比が大きいほど充てん密度が高まることが実験結果から得られているので、粒度分布が広いほど充てん密度が高くなると言える。しかし、その形状はBと同じではない。Bの粒度分布はなめらかに分布しているが、Cの粒度分布は階段上である。Bのような粒度分布とする

ためには、たくさんの粒径のペレットを混合することが必要となる。

2 粒径混合ペレットで最も充てん密度が高くなった仕様は、20mm ペレットと 4mm ペレットを重量比で 60:40 に混合したものである。図 5.2-1 より粒度分布を求めると図 5.7-5(a)のようになる。得られた充てん密度は 1.54Mg/m^3 である。一方、3 粒径混合ペレットで最大の充てん密度が得られ

た仕様は、20mm ペレット、4mm ペレット、1mm ペレットを重量比で 60 : 20 : 20 に混合したものである。同様に粒度分布を求めると図 5.7-5(b)のようになり、充てん密度は 1.50Mg/m^3 であった。

2つの粒度分布は、粒径分布の範囲が同じで、なめらかさが異なる材料である。充てん密度の違いはわずかではあるが、粒度分布になめらかさのない2粒径混合ペレットのほうが高い。実験のバラツキ等を考慮しても、粒度分布のなめらかさを得るために最大粒径と最小粒径の間に中間の粒径を混合する必要はないと考えられる。3粒径以上の混合については、充てん実験では確認していないが、同様の考え方から充てん密度を高める効果はないと推察される。

なお、図 5.7-5(a)に示した2粒径混合ペレットに、1mm ペレットより小さい、もしくは20mm ペレットより大きいペレットを混合し、3粒径混合ペレットとすれば粒径範囲は広がるため、充てん密度は高まると予測される。その場合でも、中間的な粒径のペレットを除いて、大ペレットと小ペレットのみとしたほうが充てん密度を高める効果はあると考えられるし、仮にその違いがわずかであっても、本研究で使用しているベントナイトペレットは、ほぼ粒径の揃った状態で製造されるため、使用する粒径が少ないほど煩雑さは低減される利点が大いと考えられる。

同様の結果を鈴木らは、大、中、小の3種類の異なる粒径のガラスビーズを混合した場合、大と小だけからなる混合体が、最も充てん率が高いことを、充てん実験によって示している⁶⁾。

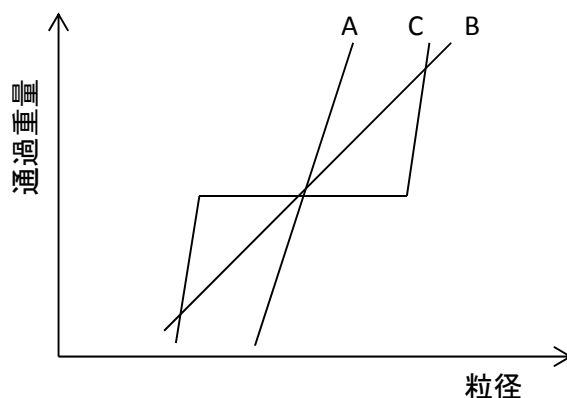
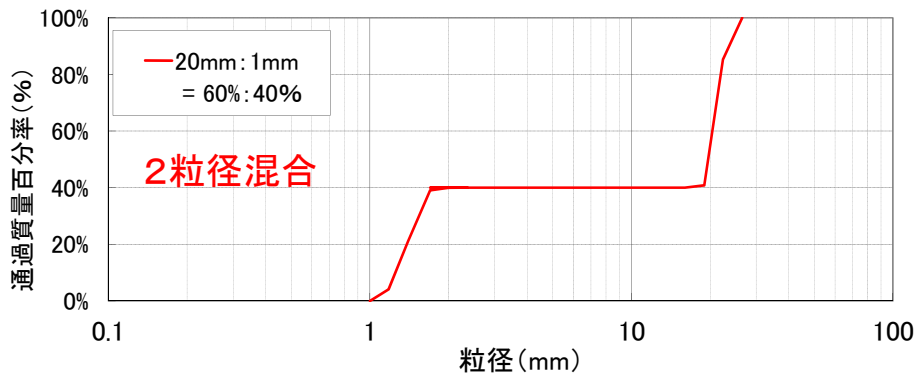
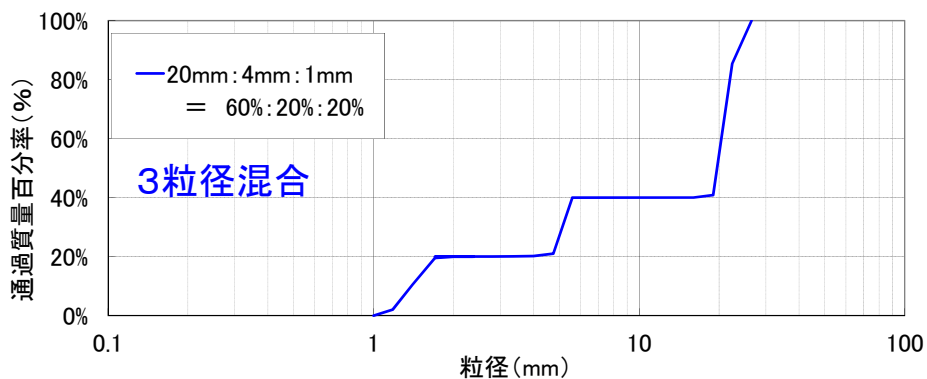


図 5.7-4 様々な形状の粒度分布



(a) 2 粒径混合ペレット (20mm : 60wt% + 1mm : 40wt%)



(b) 3 粒径混合ペレット (20mm : 60wt% + 4mm : 20wt% + 1mm : 20wt%)

図 5.7-5 単独ペレット充てん実験で得られた充てん率と充てん密度

5.8 5章の結論

使用したベントナイトペレットの充てん性能を把握し、混合割合などの材料調整方法を明らかにするために実施した小型容器を用いた充てん実験から以下のことが明らかになった。

- (1) 球形で単体密度 2.0 Mg/m^3 程度のベントナイトペレットは、緩衝材相当の性能を有するために必要な充てん密度 1.37 Mg/m^3 を満足できる可能性が高いことを確認した。ただし、異なる粒径のペレットを適切に組み合わせたり、混合割合を適切に調整する必要がある。
- (2) 粒径の異なる 1mm、2mm、4mm、15mm、20mm の5種類のベントナイトペレットを用いて、ペレットの組み合わせや混合割合を変えて、2粒径混合ペレット、3粒径混合ペレットの充てん密度を測定した結果、最大粒径と最小粒径が同じであれば、中間的な粒径を混在させない2粒径混合ペレットのほうが高い充てん密度が得られ

ることを確認した。

- (3) 最大の充てん密度が得られた2粒径混合ペレットの条件は、粒径が最も大きい20mmペレットと最も小さい1mmペレットを、60:40で混合した場合であり、得られた充てん密度は1.54 Mg/m³であった。
- (4) 2粒径混合ペレットでは、粒径の違いを粒径比で表し、充てん性の指標を充てん率で表すと、粒径比が大きいほど充てん率が大きくなる関係が、ペレットの組み合わせによらず得られることが推察された。

参考文献

- 1) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成19年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第1分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2），2008.
- 2) 戸栗智仁，景山仁志，朝野英一，沖原光信，岩佐健吾，中島均，石井卓：横置き定置方式における緩衝材周辺隙間へのベントナイトペレットの充てん方法に関する研究，土木学会第63回年次講演会，pp.191-192，2008.
- 3) 最上武雄：第8章 粒状体の力学，土木学会監修 最上武雄編著 土質力学，pp.904～914，技報堂，1969.
- 4) 社団法人化学工学協会：改訂五版化学工学便，4.3 粒子の充てん特性，pp.239～256，丸善株式会社，1988.
- 5) Horsfield, H. T. : The strength of Asphalt Mixtures, Journal of the Society of Chemical Industry, 53,(1), 107, 1934.
- 6) 鈴木道隆，八木章，渡辺球夫，大島敏男：3成分球形粒子ランダム充填層の空間率の推定，化学工学論文集，Vol.10, No.6, 1984.
- 7) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: Soil properties and Behaviour, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. (山内豊聡，竹中肇，東山勇，前田隆監修：新編土質工学の基礎，鹿島出版会，1978.)

第6章 実寸規模の横方向すき間充てん実験

6.1 はじめに

本章では、実規模サイズのすき間へのベントナイトペレットの充てん実験を行った^{1),2)}。5章で示した小型容器で得られた充てん密度と比較することで、実規模サイズのすき間の充てん性能を検討した。実際のすき間は小型容器とは形状が異なり、規模も大きいいため、境界まで十分に充てんできないことや、粒径の異なるペレットの分離などにより、十分に充てんできない可能性があった。使用したベントナイトペレットは、小型容器充てん実験で最大充てん密度が得られた20mmペレットと1mmペレットを重量比60:40の2粒径混合ペレットである。

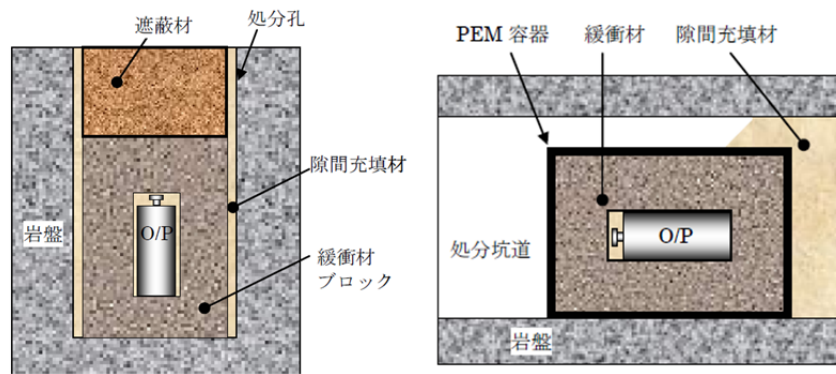
また、対象とするすき間としては、これまでに実験的検討が行われておらず、充てん方法にも工夫が必要と考えられた、横置き定置方式における横方向に広がるすき間を想定した。充てん方法を想定し、2種類の汎用的な粉体搬送機器を用いて充てん実験を行い、充てん装置への要求事項や、すき間幅や形状といったすき間への要求事項を検討した。

6.2節で、対象としたすき間を示し、それを模擬した充てん型枠について述べた。6.3節では、充てん実験に用いた2種類の市販の充てん装置について述べた。6.4節では、実験ケースを示し、6.5節では実験結果を示し、考察を行った。

6.2 想定したすき間と実寸規模充てん型枠

6.2.1 想定したすき間

緩衝材の施工方法として様々な方法が考えられており、縦置き処分方式と横置き処分方式では、図6.2-1に示すようにすき間の形状が異なる。



(a) 縦置き処分

(b) 横置き処分

図 6.2-1 緩衝材周囲に発生するすき間の例 (文献1) より引用)

る。図 6.2-1(a)の縦置き方式はベントナイトブロックを積み上げて緩衝材を構築する例を示しており、緩衝材と処分孔壁面との間にすき間が生じる。図 6.2-1(b)は例として、PEM 方式³⁾を示しており、PEM 容器と処分抗道壁面との間にすき間が残る。横置き方式には、ベントナイトブロックを積み上げて緩衝材を構築する方式もあるが、これにおいても PEM 方式と同様のすき間が生じる。

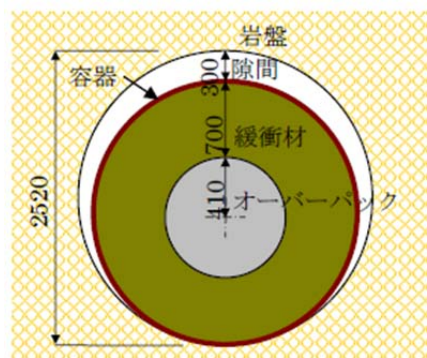
縦置き方式では、すき間は鉛直方向に一定幅で長く存在する。これに対して横置き方式では、すき間は横方向に長く広がり、場所によりすき間幅も変動する。このため、横置き方式では充てん方法にも工夫が必要となる。本実験では、横置き定置方式で生じる横方向すき間を対象とした。

6.2.2 すき間の形状断面

横方向すき間の断面形状は一般的に図 6.2-2 に示すように天端が広い形状となると考えられる。すき間幅は施工方法によって異なり、所定の施工を行うために必要なすき間幅として設定されると考えられる。しかし、施工技術の検討は検討途上であり、確定的な寸法を示すことは難しいので、次のように想定した。

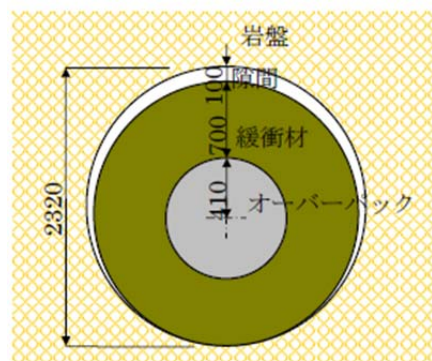
PEM 方式の場合は PEM 容器の中にオーバーパックと緩衝材が格納され、重量で 35 トンもの重量物となる。PEM を搬送する方式としてエアパレット方式の検討が進められている。それによれば、PEM の下部をエアパレットで受けるためには、150mm 程度のすき間が必要とされている⁴⁾。すなわち、エアパレットを引き抜くと上部に 300mm 程度のすき間が生じる。

一方、ベントナイトブロックを用いる方式では、1 辺が数 10cm 程度のブロックに分割し、これを積み上げる。PEM 方式に比べて、各々の重量が小さいため、すき間幅は小さくなると考えた。施工方法



(単位:mm)

(a) PEM 方式



(単位:mm)

(b) ブロック定置

図 6.2-2 緩衝材周囲に発生するすき間の断面図 (文献 1) より引用)

に関する検討は進んでいないため、必要となるすき間幅を PEM 方式の 1/3 程度と想定した。

本実験では天端部のすき間幅を図 6.2-2 に示すように、PEM 方式の場合は 300mm 程度、ブロック定置方式の場合は 100mm 程度と想定した。

6.2.3 充てん方法

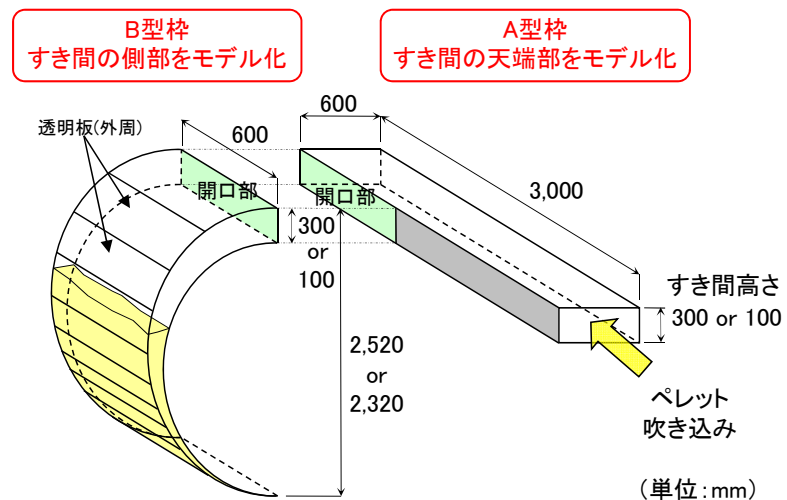
想定したすき間の充てん方法として本実験では、坑道上部の天端部に充てん装置を挿入し、そこにベントナイトペレットを吹込み、下向きにベントナイトペレットが落下してすき間を充てんする方式（天端吹込み方式）を、技術的成立性や適用の容易性の点で合理的と考えた。

6.2.4 充てん型枠

実寸規模充てん実験ではすき間を、図 6.2-3 に示すように、分割した A,B 2 種類の型枠で模擬した。

A 型枠は、充てん装置を挿入するスペースとなる天端部付近のすき間を模擬した。型枠の高さは 100mm と 300mm の 2 種類とし、それぞれ図 6.2-2 で想定した天端のすき間幅を実寸幅で模擬した。横幅は充てん装置をすき間内部に挿入するために必要となる 600mm とした。奥行きは、オーバパック 1 体の前後に厚さ 70cm 程度の緩衝材が設置されることを想定して 3m とした。型枠の奥側に B 型枠と接続するための開口部を設けてあり、この開口部を塞ぐと A 型枠のみの充てん実験ができる。

B 型枠で緩衝材側部のすき間を模擬した。上部の開口部で A 型枠と接続し、A 型枠の内部に充てん装置を挿入する。充てん装置から吹き込まれたベントナイトペレットは B 型枠内を落下することで充てんされる。坑道のすき間は左右対称なので、A 型枠は左側半分のすき間を模擬した寸法・形状とした。奥行きは 600mm とした。



6.3 充てん装置と充てん実験の方法

ペレットをすき間に吹込むための充てん装置として、汎用的な粉体材料の搬送装置に着目した。粉体材料の搬送装置として、空気搬送方式と機械搬送方式が考えられる。方式毎に1種類の市販の装置を充てん装置として用いた。以下に使用した充てん装置の概要を示し、それぞれを用いた場合の実寸規模すき間充てん実験の方法を示す。

6.3.1 空気搬送方式（ラウンドブロー）

空気搬送方式としてエアブロー・ノズル（商品名：ラウンドブロー、サンワ・エンタープライズ社製）を用いた。ラウンドブローは圧縮空気を動力源として、周囲の空気を大量に吸引し、空気の流れを作る小型ユニットである。図 6.3-1 にラウンドブローの外観を示す。

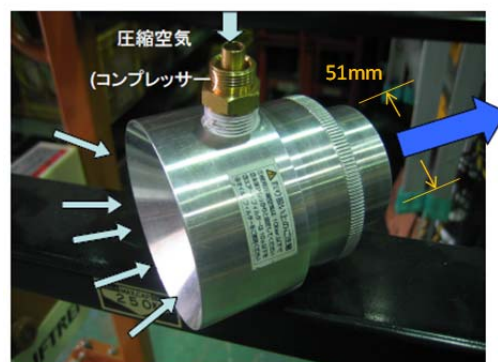


図 6.3-1 ラウンドブロー（エアブローノズル）

ラウンドブローの特徴は、与える圧縮空気圧を調整することでペレットの吐出力を微調整でき、吐出力もコンクリート吹付機などと比べて小さいことである。吐出能力が大きすぎるとペレットの破損や飛散・跳ね返り等により充てん性が低下することが懸念された。

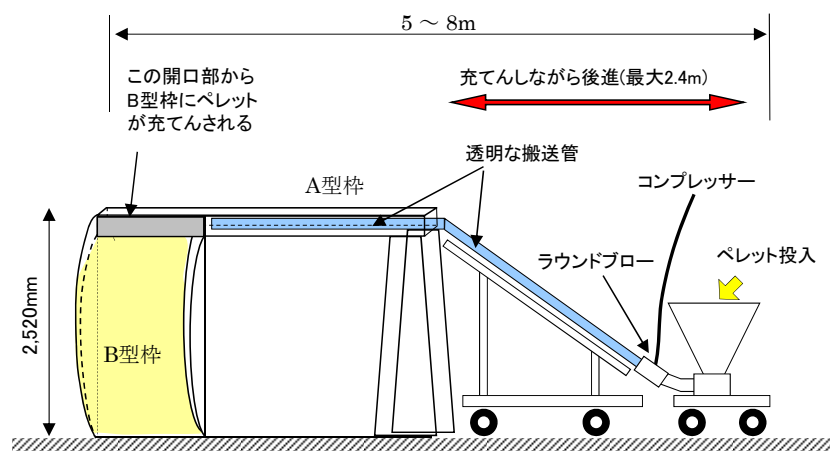


図 6.3-2 ラウンドブローを用いた充てん方法

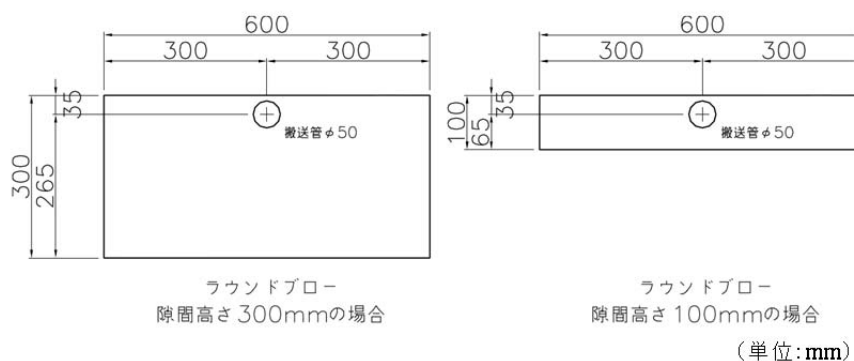


図 6.3-3 ラウンドブローの場合のノズル位置

ラウンドブロー

を用いた充てん方法を図 6.3-2 に示す。ラウンドブローの吐出側（図 6.3-1 の画面右側）に透明な搬送管（径 50mm）を継ぎ、搬送管の先（吐出口と呼ぶ）からペレットが吹き出す構造とした。吐出口をA型枠の奥にセットした状態でペレット充てんを開始し、充てんの進捗に合わせて、搬送管を含む充てんユニット全体を後方に移動させる方法で充てん実験を行った。

吐出口は図 6.3-3 に示すように左右の中心の、できるだけ上部に固定した。すなわち、今回の実験では吐出位置は奥行方向には移動させたが、上下左右方向に移動させることはしなかった。

図 6.3-4 に充てん実験の全景図を示す。

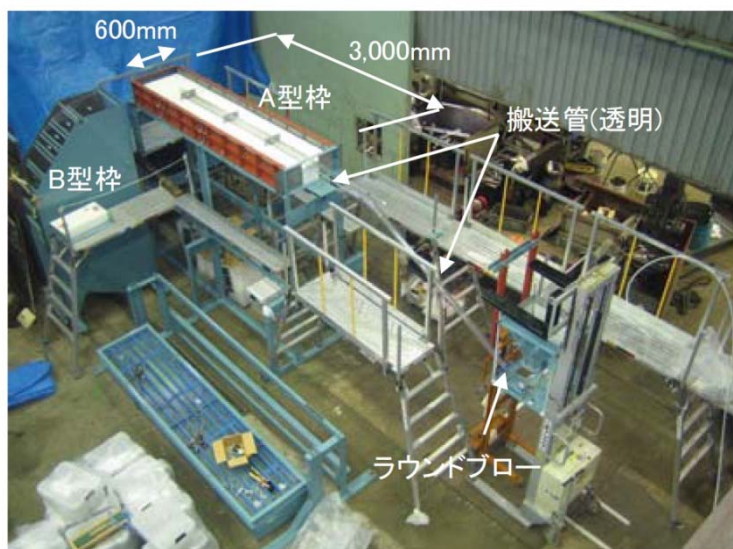


図 6.3-4 ラウンドブローを用いた充てん実験の全景図

6.3.2 機械搬送方式（エアロベイヤ）

機械搬送方式として機械式コンベヤー（商品名：エアロベイヤー、日本総代理店：富永物産株式会社）を用いた。エアロベイヤーの外観および構造を図 6.3-5 に示す。2本の金属管と材料吐出口および材料投入口が一体となった装置である。粉粒体の搬送装置として使用実積が多い。



図 6.3-5 エアロベイヤーの概要

投入された材料は片側の金属管の中を移動し、材料吐出口から遠心力および空気流によって吐き出される。2本の金属管の中には、高速で回転する1本の金属ワイヤーがあり、金属ワイヤーには等間隔に円盤状の仕切り板が設けてある。ワイヤーが金属管の中を移動すると、仕切り板の間の空気も一緒に移動するので、そこに材料を浮かせる状態で確保し、吐出口まで運ぶのが搬送原理である。

エアロベイヤを用いた充てん方法を図 6.3-6 に示す。エアロベイヤ本体を横にした状態で、A 型枠の奥まで挿入する。吐出口を A 型枠の奥にセットし、充てんの

進展に合わせて、エアロベイヤ自身を引き抜く方法とした。図 6.3-7 にはエアロベイヤの A 型枠断面での位置を、図 6.3-8 にはエアロベイヤを A 型枠に挿入した状態を示す。エアロベイヤ本体はラウンドブローの搬送管に比べて大きく、A 型枠の大部分を占めることになるため、結果として吐出口は型枠の中心に設定することになる。

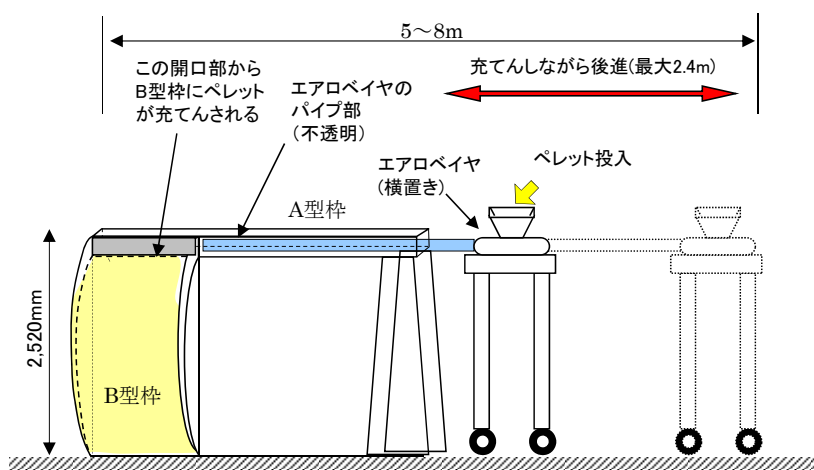


図 6.3-6 エアロベイヤを用いた充てん方法

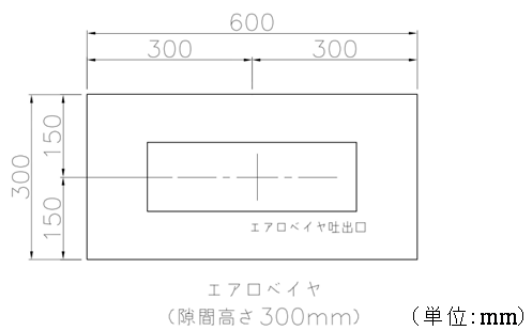


図 6.3-7 エアロベイヤの場合のノズル位置

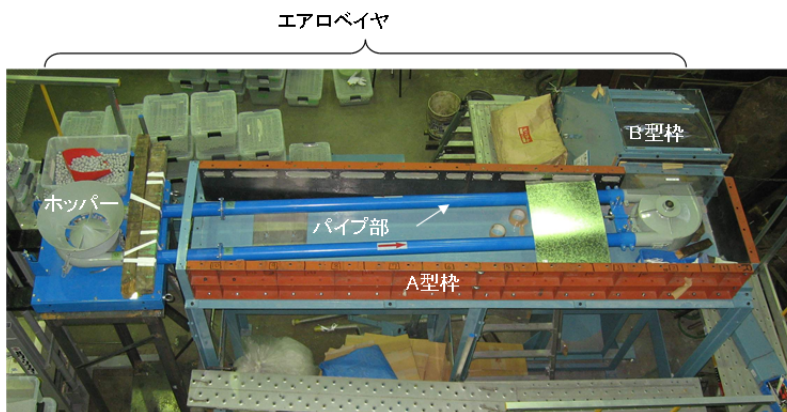


図 6.3-8 エアロベイヤを充てん型枠に挿入した状態

6.4 実験ケース

6.4.1 A型枠の充てん実験

想定した充てん方法ではベントナイトペレットを、すき間の天端部に吹き込むため、まずA型枠のみを用いて天端部の充てん性を確認した、実験ケースを表 6.4-1 に示す。

充てん装置としてラウンドブローを用いる充てん実験は、すき間高さ 100mm と 300mm の2種類のA型枠に対して行った。エアロベイヤを用いた場合は100mmのA型枠にはサイズの関係で挿入できないため300mm型枠のみに対して実施した。

ラウンドブローについては、供給空気圧が異なると吐出力が変わり、充てん性が変わることが予想されたため、供給空気圧が異なる条件を設定した。

充てん材料は、小型容器充てん実験で最大充てん密度が得られた2粒径混合ペレットとした。すなわち20mmペ

レットと1mmペレットを重量比で60:40にあらかじめ混合した材料である。これを標準混合条件とした。A型枠での実寸規模充てん実験では標準混合条件の2粒径混合ペレットのみを実験対象とした。

表 6.4-1 A型枠を用いた充てん実験の実験ケース

CASE No.	すき間高さ (mm)	充てん装置	供給空気圧 (MPa)	充てん材料
A-1	100	ラウンドブロー	0.45	2粒径混合ペレット (標準混合条件)
A-2			0.55	
A-3			0.65	
A-4	300		0.55	20mm 60wt% + 1mm 40wt%
A-5			0.65	
A-6	300	エアロベイヤ	---	

6.4.2 B型枠の充てん実験

すき間側部への充てん性を確認するために、B型枠への充てん実験を行った。すき間の側部は天端部に吹き込まれたベントナイトペレットが自由落下することにより充てんされる。実験時は、B型枠にA型枠を連結しており、充てん装置はA型枠内に挿入しベントナイトペレットを吹き込んだ。実験ケースを表 6.4-2 に示す。

すき間高さ 300mm の型枠に対しては、充てん装置を変えた2ケースを実施し、充てん能力の違いを評価した。充てん材料は、A型枠の充てん実験と同様に標準混合条件の2粒径混

合ペレットとした。

表 6.4-2 B型枠を用いた充てん実験の実験ケース

すき間高さ 100mm の型枠
 に対しては、充てん材料を変
 えた3ケースを行った。充て
 ん装置はラウンドブローを用
 いた。まず、標準混合条件の
 2粒径混合ペレットで実施し、
 300mm 型枠の結果と比較し、
 すき間高さの違いによる充て

CASE No.	すき間高さ (mm)	充てん装置	充てん材料
B-1	300	ラウンドブロー	2粒径混合ペレット (標準混合条件) 20mm 60wt% + 1mm 40wt%
B-2		エアロベイヤ	
B-3	100	ラウンドブロー	4mm 50wt% + 1mm 50wt%
B-4			
B-5			

ん性の違いを確認した。後述するように 100mm 型枠の場合は、20mm ペレットを含む標準混合条件の2粒径混合ペレットでは、すき間幅が狭いため適正な充てん密度が得られない部位が多かったため、粒径の小さいペレットで構成される充てん材料を用いる2ケースを実施した。

なお、300mm 型枠、100mm 型枠のすべてのケースにおいてエアロベイヤの供給空気圧は 0.65MPa に設定した。

6.5 実験結果と考察

6.5.1 A型枠の充てん実験

図 6.5-1 に、A型枠の充てん密度を示す。充てん完了後に、長さ 3000mm の A型枠を長さ方向に 10 分割し、充てん密度を求めた。充てん密度は、当該区間に存在するベントナイトペレットの重量を計測し、実験時にベントナイトペレットが若干の水分を含んでいたため、別途求めた含水比で補正して乾燥密度として示した。

(1) 充てん装置の違い

図 6.5-1 において 300mm 型枠のケースに着目すると、ラウンドブローの充てん密度は 1.26~1.42 Mg/m³ と高く、エアロベイヤは 0.46~0.65 Mg/m³ と低いことがわかる。

しかし、高い方のラウンドブローの場合においても、小型容器充てん実験で得られた充てん密度 1.54Mg/m³ は達成できていない。これは型枠上部に未充てん領域が残ったためである。目視観察の結果では、左右中央部では型枠の上部までペレットが充てんされていたが、左右端では上部に未充てん部が残っていた。今回の実験では図 6.3-3 に示すようにラ

ラウンドブローの吐出口の位置を上下左右方向に固定してペレットの吹き込みを行ったため、左右端にはペレットが流れ込まず上部に未充てん部が残る結果となった。吐出口を左右上下に移動させる機構を追加することで、充てん密度を改良できると考えられる。

エアロベイヤの場合は、より多くの未充てん部が

残ったため、ラウンドブローに比べて充てん密度が低くなった。目視観察では、左右端だけでなく、左右中央部にも型枠上部に未充てん領域が残っていることが確認できた。図 6.3-7 に示したようにエアロベイヤの吐出口が型枠の中心部にセットされ、左右上下に動かせなかったためと考える。さらに別の要因として吐出速度の影響も考えられる。ブロー効果によりペレットが吐出口から勢いよく吐出されるラウンドブローと異なり、エアロベイヤは機器の性質上、吐出速度が小さい。このことは吐出されたペレットが遠くまで届かないことを意味し、未充てん部が増加することにつながった可能性がある。

また、エアロベイヤのケースで、距離 1500mm を境に充てん密度が 0.5Mg/m³ 程度から 0.6Mg/m³ 以上に変化している。これは実験の途中で吐出口とペレットの充てん表面との距離を変えたためである。エアロベイヤは吐出速度が遅いため、吐出口を充てん表面になるべく近づける必要があると考えられる。距離の違いが充てん密度に影響を与えることから、機器の位置制御が難しいと考えられる。

(2) すき間高さの影響

充てん装置としてラウンドブローを用いた場合は、すき間高さ 300mm 型枠と 100mm 型枠の場合で充てん密度が異なった。図 6.5-1 に示すように、すき間高さ 300mm では充てん密度は 1.26~1.42 Mg/m³ であったが、すき間高さ 100mm ではそれよりも低い 0.68~0.96 Mg/m³ であった。両ケースとも同程度の未充てん部が残っており、充てん密度に換算する

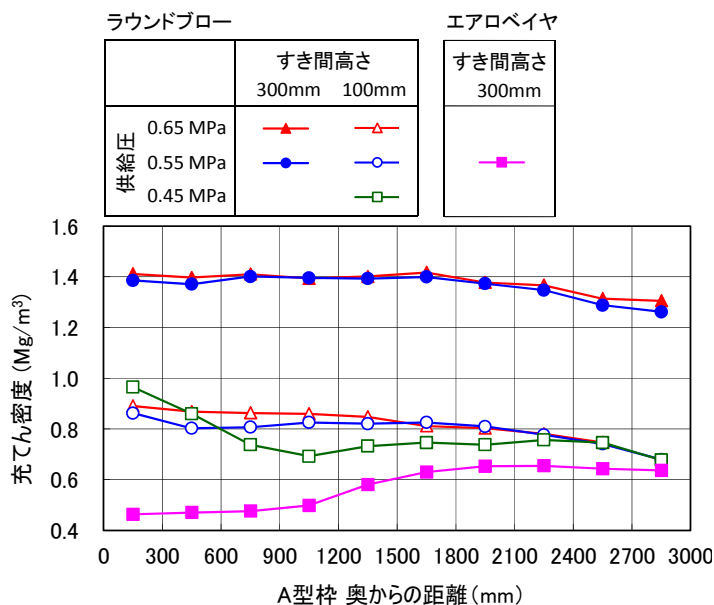


図 6.5-1 A 型枠の充てん実験の結果

と、すき間高さの低い方が充てん密度が低くなる結果となった。

(3) ラウンドブローの供給空気圧

ラウンドブローは供給空気圧を調整するとペレットを運ぶ空気の速度が変わり、結果的にペレットの吐出速度が変わる。供給空気圧を3段階に変えたときに、ペレットの吐出速度が変わることは、定量的な測定は行えなかったが、目視により確認した。また、参考データとして時間当たりの吹き込み量を測定した。供給空気圧を 0.45MPa、0.55MPa、0.65MPa と上げると、ペレットの時間当たり吹き込み量が 3.2kg/分、5.0kg/分、6.3kg/分と高まることを確認した。

しかし、図 6.5-1 からわかるように吐出速度が充てん密度に与える影響は、すき間高さの影響などに比べて大きくなかった。設定した供給空気圧の範囲では充てん密度に明確な差は確認でなかったが、吐出速度が低いエアロベイヤでの結果も含めると、吐出速度が速いほうが充てん密度が高まると考えたため、設定できる最大圧である供給空気圧 0.65MPa で B 型枠の充てん実験を行うこととした。

6.5.2 B 型枠の充てん実験

B 型枠の充てん実験では、高さ方向に分割して充てん密度とペレットの混合割合を求めた。結果を 300mm 型枠のケースは図 6.5-2 に、100mm 型枠のケースは図 6.5-3 に示す。分割した区間は図中に、300mm のケースは①～⑪で、100mm のケースは①～⑫で示した。充てん密度は、A 型枠の場合と同様に乾燥密度である。また、充てん密度のグラフには実験結果とともに、標準混合条件の 2 粒径混合ペレットで得られた小型容器充てん実験における充てん密度 1.54 Mg/m³ を青の破線で、また冒頭に述べた現状での達成目標と考えられる 1.37 Mg/m³ を赤の破線で併記した。

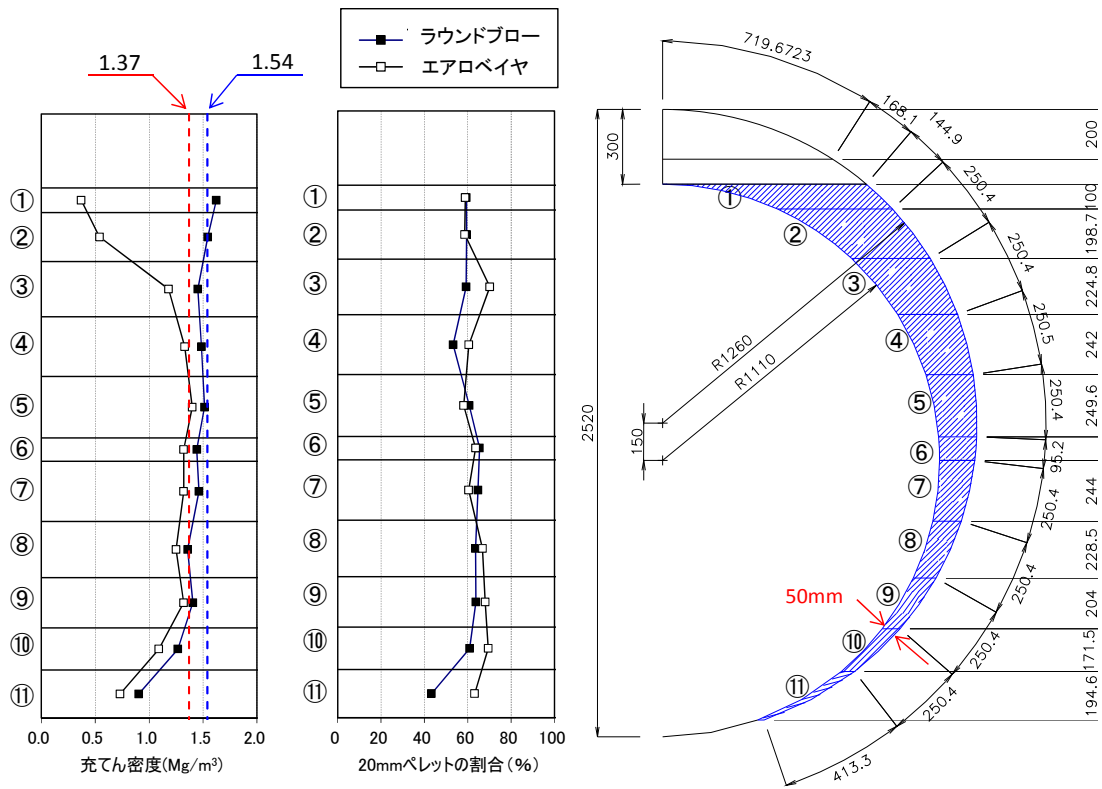


図 6.5-2 B型枠 (300mm 高さ) の充てん実験の結果

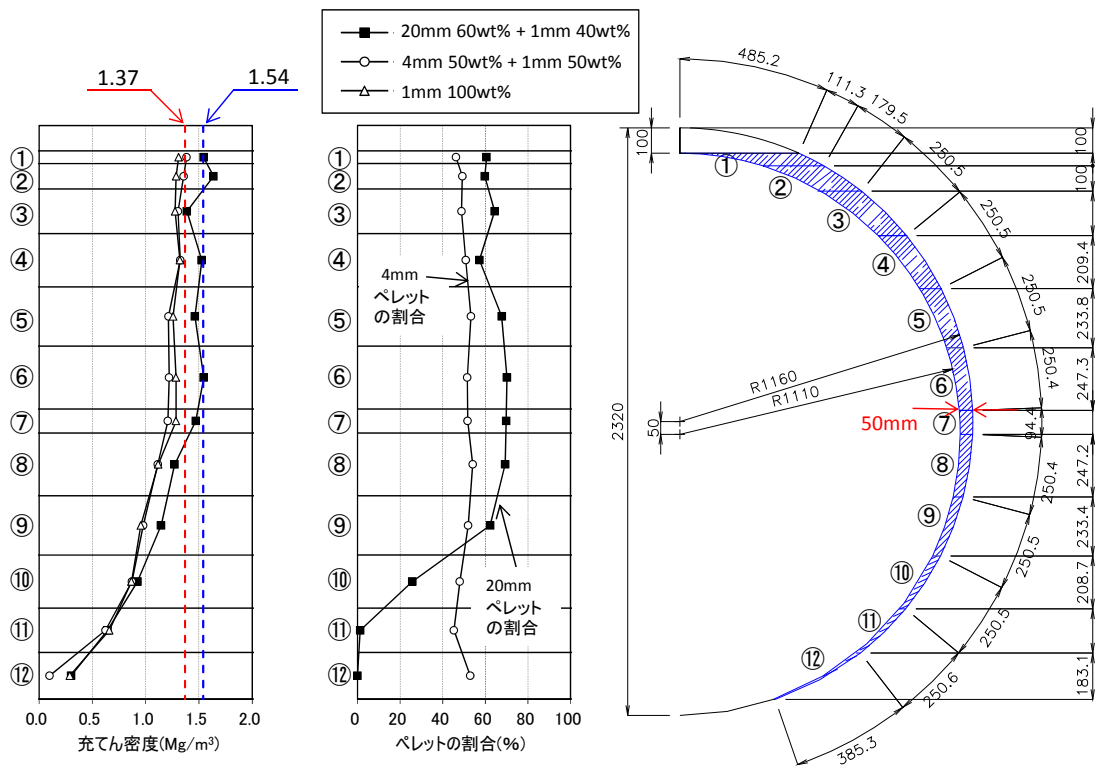


図 6.5-3 B型枠 (100mm 高さ) の充てん実験の結果

(1) 充てん装置の違い

300mm 型枠での実験結果を示した図 6.5-2 で、ラウンドブローとエアロベイヤの 2 種類の充てん装置による充てん密度の違いが確認できる。

ラウンドブローの場合、充てん密度は大部分の区間 (①~⑨) で、小型容器充てん実験での充てん密度とほぼ同等の 1.54Mg/m^3 程度を示した。しかし、下部 (⑩~⑪) では、その値より低い充てん密度を示しており、すき間がある一定幅を超えて狭い領域は充てんしにくいと言える。充てん後の 20mm ペレットの割合は、最下部の区間⑩を除くと充てん前と同じ 60%前後を示しており、充てん前とほぼ同じであるのに対して、区間⑩では 40%程度と少なくなっており、大きい粒径の 20mm ペレットがすき間が狭い部分には充てんできないことを示している。

一方、エアロベイヤの場合はラウンドブローの場合と傾向が異なり、天端に近い 3 区間 (①~③) に充てん密度が低い領域が表れる、A 型枠で考察したようにエアロベイヤの吐出速度が影響しているものと考えられる。すなわち、吐出速度が小さいと、型枠の外側 (岩盤側) にペレットが届かず、型枠の内側 (緩衝材側) に集まることで全体の充てん密度が小さくなった可能性がある。その下の区間 (④~⑨) で充てん密度が高まっているのは、上部の①~③付近をペレットが通過するときには、型枠の内側を通過するが、すき間幅は徐々に狭くなり、ペレットが落下することによる速度の増加もあり、結果的にペレットが均一に充てんされたためと考えられる。しかし、この区間においても、ラウンドブローでの充てん密度より若干小さい値を示しており、小型容器充てん実験と同等の適正な充てん密度を得るためには吹き出し時にある程度の吐出速度が必要と言える。

また、エアロベイヤのケースでは、最下部の⑪においても 20mm ペレットの割合が 60%程度と適正な混合割合を示しているにもかかわらず充てん密度が低い。これは 20mm ペレットが破碎されたことが原因と考えられる。エアロベイヤの内部で 20mm ペレットが吐出前に破碎され、吐出時に破砕片が一定量混じることが確認された。この破砕片は 20mm ペレットよりも小さいため区間⑪にも届き、20mm ペレットとして計量されるが、破砕片は形状が不規則で、ペレットとしての密度も低くなっていると考えられるため充てん密度が低くなったと考えられる。

以上の結果より、充てん装置としては、ラウンドブローの方がエアロベイヤよりも優れていると考えられる。

(2) すき間高さの影響

図 6.5-2 (300mm 型枠) および図 6.5-3 (100mm 型枠) の両方に■マークで示したプロットは、どちらもラウンドブローを用いて標準混合条件の2粒径混合ペレットを充てんした結果である。充てん密度の深さ方向の変化は同じ傾向であり、上部では 1.54 Mg/m^3 程度の一定値を示し、ある位置を境に下部に行くにつれて充てん密度が低下する。充てん密度が小さい区間は 300mm 型枠は2区間 (⑩, ⑪) であるが、100mm 型枠は5区間 (⑧~⑫) と範囲が広い。100mm 型枠の方が、すき間幅が狭い領域が多いためである。図中にすき間幅が 50mm となる位置を示した。この位置が充てん密度が低下する境界と一致する。すき間幅が 50mm より狭い領域は、適切な充てん密度が得られないと言える。

(3) ペレットの粒径の影響

図 6.5-3 に示した3ケースは、それぞれ充てん材料が異なる。標準混合条件の2粒径混合ペレットは最大粒径が約 20mm であり、このことが 50mm 幅より狭いすき間の充てん密度が低下する原因であると考えられたため、最大粒径が小さいペレットによる充てん密度向上効果をラウンドブローを用いた充てん実験で確認した。

3ケースとも充てん密度の深さ方向変化は同じ傾向を示しており、すき間上部はほぼ一定値を示し、ある位置を境に下方向にはしだいに充てん密度が低下する傾向を示した。

上部のほぼ一定値を示した充てん密度は、バラツキはあるものの、小型容器充てん実験で得られた充てん密度と同程度と考えられ、この部分に関しては適正に充てんできていると言える。なお、小型容器充てん実験で得られた充てん密度は、それぞれ、標準混合条件の2粒径混合ペレットが 1.54 Mg/m^3 、4mm ペレットと 1mm ペレットを重量比で 50:50 で混合した2粒径混合ペレットが 1.39 Mg/m^3 (図 5.5-1 参照)、1mm ペレット単体が 1.31 Mg/m^3 (図 5.3-1 参照) である。

ほぼ一定値である充てん密度が低下し始める境界は3ケースとも、すき間幅が 50mm 程度を示す区間⑥もしくは区間⑦の付近であった。すなわち、最大粒径を小さくしても適正な充てん密度を示す範囲が、より狭いすき間幅の部分にまで拡大できないことを示している。

結果的に、最大粒径が小さいペレットを用いても、上部から下部までのすべての領域で、標準混合条件の2粒径混合ペレットで得られた充てん密度を下回っており、充てん密度の向上効果は得られなかった。

6.6 6章の結論

実寸規模充てん実験では、横置き定置方式の場合に緩衝材の周囲に発生するすき間、すなわち横方向すき間を実寸法規模の型枠で模擬し、市販の搬送機器を用いてベントナイトペレットを吹き込み方式で充てんし、充てん密度に対するすき間条件や施工方法の影響を検討した。これにより以下のことが明らかになった。

- (1) 天端部分に吹き込んだ2粒径混合ペレットはすき間部を下方に落下し、充てんしにくい一部を除いて、小型容器充てん実験の結果と同等程度の充てん密度で充てんできることを確認した。使用した2粒径混合ペレットは、小型容器充てん実験で最大の充てん密度 (1.54 Mg/m^3) が得られた 20mm ペレットと 1mm ペレットを 60:40 で混合した材料である。
- (2) ベントナイトペレットを吹き込むための充てん装置として、空気圧送式(ラウンドブロー)と機械式(エアロベイヤ)を比較すると、空気圧送式の方が充てん密度が高く、充てん装置として適していることがわかった。これは、空気圧送式の方がペレットの吐出速度が速いためと考えられ、ペレットの落下により充てんされる側部すき間に対しても、ある程度の吐出速度が必要であることがわかった。
- (3) 今回の実験では天端部分に未充てん領域が残った。最も大きい原因としてペレットの吐出位置を固定して左右に動かさずに充てん実験を行ったことが考えられる。吐出位置を適切に制御できれば、ペレットが届かなかった天端部の左右にまでペレットを吹き込むことができ、未充てん空間は減少するものと考えられる。今後、充てん装置の検討を進めていく段階で、吐出口を左右上下に移動できるような制御機構を採用していくことが重要である。
- (4) 本実験で対象とした下部にいくほど狭くなる形状のすき間では、すき間幅が 50mm より狭い部分は適切な充てんができず、小型容器充てん実験で得られた充てん密度を大きく下回ることが明らかになった。対応策としては、このような狭いすき間を作らないことも一つの方策であり、台座を用いて緩衝材や PEM を嵩上げし、一定間隔以上のすき間を意図的に確保する方法などが考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2），2008.
- 2) 戸栗智仁，景山仁志，朝野英一，沖原光信，岩佐健吾，中島均，石井卓：横置き定置方式における緩衝材周辺隙間へのベントナイトペレットの充てん方法に関する研究，土木学会第 63 回年次学術講演会，pp.191-192，2008.
- 3) Kawakami, S. et al. : Design options for HLW repository operation technology:Part III- Transpotation and horizontal emplacement of pre-fabricated EBS module (PEM). Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Volume 2, ICEM2010-40268, pp. 497-502, 2010.
- 4) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2），2010.

第7章 結論

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、300m 以深の地層に廃棄物を埋設し、数万年以上の超長期にわたって生活圏から隔離する。緩衝材は地層処分のなかで、廃棄物の周囲に配置される人工バリアのひとつであり、低透水性や自己シール性などが期待され、膨潤性の天然粘土であるベントナイトが候補材料として考えられている。緩衝材の構築は地下の狭隘な空間において行われることになり、適切に構築することの難易度が高いことから、複数の施工方法が候補として提案され、それぞれに研究開発が進められている。これらの施工方法のなかには、緩衝材に周囲にすき間が発生する施工方法があり、適切に処理しなければ緩衝材の性能が低下するなどの悪影響があることも指摘されている。すき間を適切に充てんできれば、このような問題を解決できるが、すき間充てん技術に関する検討は進んでおらず、技術の確立が望まれている。

本研究は、緩衝材周囲に施工時に発生するすき間に着目し、ベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術の確立を目的として実施した実験的研究をまとめたものである。具体的には、以下の2つの内容で構成されている。

- ・ベントナイトペレットの製造方法に関する研究
- ・それを用いたすき間充てん技術に関する研究

本研究の概要と得られた成果を以下にまとめる。

第1章では研究の背景と目的を示した。

第2章では、緩衝材の施工方法を示し、施工によって発生するすき間を明らかにしたうえで、すき間充てん技術の確立の必要性と既存の研究について整理した。また、充てん密度の目標値を緩衝材と同等の性能が得られる 1.37Mg/m^3 と設定した。

第3章および第4章では、すき間充てんに適した高密度なベントナイトペレットの製造方法について検討した。第3章では、はじめに、すき間充てん材の候補であるベントナイト原鉱石の破碎材料や、粉体ベントナイトからペレットを製造する既存のさまざまな方法について整理した。この結果、原鉱石破碎材料は、粒そのものの密度が 1.8Mg/m^3 程度と低いこと、また粉体ベントナイトからペレットを製造する方法では、高密度化するには高圧载荷が必要で、製造コストが高くなることなどが考えられた。このため、高密度なベント

ナイトペレットを製造する方法として、比較的水分が多い状態で球形の湿潤ペレットを製造し、乾燥収縮を利用して高密度化する新たな製造方法を提案した。湿潤球形ペレットの製造は、粉体加工分野で用いられている汎用機器と方法を用いた。ベントナイトでの製造実績がなかったため、製造実験を行って球形のペレットが製造できることを確認した。さらに、球形に成形した湿潤ベントナイトペレットは水分量が多く低密度であるが、ゆっくりと乾燥させる乾燥条件を設定すると、良好な乾燥収縮が得られ、原鉱石破碎材料より密度の高い乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度のベントナイトペレットが製造できることが明らかになった。

第4章では、3章で示したベントナイトペレットの製造方法のなかで、品質や生産性に直結する乾燥工程の確立に向けた検討を行った。具体的には、商用製造に適した乾燥機器を想定した乾燥方法にて、乾燥温度や風速をパラメータとした乾燥実験を行い、乾燥収縮によるベントナイトペレットの密度増加過程を把握した。この結果、高密度なペレットを製造するためには、乾燥の初期に低温でゆっくり乾燥させることが重要であることや、ある程度乾燥が進んだ段階では高温で絶乾状態まで乾燥させることが有効であることが明らかになり、実際の製造技術の確立に資する知見が得られた。また、ベントナイトの場合は、他の一般的な土質材料と異なり、完全乾燥になるまで乾燥収縮が進むことが明らかになった。

第5章および第6章では、考案した方法で製造したベントナイトペレットを用いて、すき間充てん技術について検討した。第5章では、ベントナイトペレットの充てん性能を、小型容器を用いた室内充てん実験で確認した。粒径の異なるベントナイトペレットを単独で用いた場合は、単体の密度が高いにも関わらず、目標とする充てん密度 1.37Mg/m^3 が得られなかった。そこで、粒径の異なる複数粒径のペレットを混合することで、充てん密度を高める方法を検討した。2種類のペレットを混合した場合には、粒径の差が大きいほど、高い充てん密度が実現できることが明らかになった。配合割合の最適値は、40～60%程度であった。今回の実験に用いたペレットは1mm、2mm、4mm、15mm、20mmであり、20mmペレットと1mmペレットを重量比60:40で混合した材料で最大充てん密度 1.54Mg/m^3 が得られた。なお、3種類のペレットを混合した場合には、これ以上の充てん密度が得られなかったため、3種類以上のペレットを混合しても充てん密度の向上は見込めないと判断した。

第6章では、実際のすき間を実寸法規模の型枠で模擬し、ベントナイトペレットの充て

ん実験を行った。これまで検討が行われておらず難易度が高いと考えられた、横置き定置方式の場合に生じる横方向すき間を対象とした。このようなすき間の充てん方法として、すき間の天端部にベントナイトペレットを吹込み、ペレットが自由落下することで、下部のすき間を充てんする方法を想定した。ペレット吹込み装置として、2種類の市販の粉体搬送装置（機械式と空圧式）を用いた。ベントナイトペレットは、第5章の室内充てん実験で最も充てん密度が高かった、20mm ペレットと 1mm ペレットを重量比 60:40 で混合した材料とした。実寸規模充てん実験の結果、ペレットの吹き出し速度が速い空圧式の搬送装置を用いると、最下部と天端部の一部を除いて、室内充てん実験で得られたと同等の充てん密度が確保できることがわかった。天端部は吹込み口の位置制御を行うことで解決できる見通しを示し、最下部は台座等を用いて緩衝材自体を嵩上げすることが必要であることを述べた。

最後に、ベントナイトペレットを用いたすき間充てん技術の課題を示す。

ベントナイトペレットの製造技術に関しては、提案した新たな製造方法で乾燥密度 2.0Mg/m^3 程度のペレットが製造できること、これを実現するために重要となる乾燥収縮挙動については明らかになったが、効率的な製造を実現するための課題が残っている。ベントナイトペレットが実際の充てん材料として使用されるのは数10年後になると考えられるが、充てん材料として有効なことを示すために、数々の試験による検討が今後、行われていくと思われる。その中では実規模の充てん試験による実証も行われなければならない、数10トンものベントナイトペレットを製造することが必要となる。このような要求に対応するためには、実際の乾燥装置を用いた乾燥実験により効率的な製造技術を確立することが不可欠である。本研究で実施した送風型回転乾燥機を用いた乾燥実験は容積が100リットルのテスト機を用いて行ったが、実機は大きいもので容積が 10m^3 であるので、その規模の差は非常に大きい。規模が大きくなることによる問題点に対応していくことだけでなく、乾燥条件の設定に資するデータの蓄積も不十分であると考えられる。

すき間充てん技術に関しては、2粒径混合ペレットで緩衝材と同等な性能が期待できる密度に充てんが可能なこと、実際に想定した充てん方法や充てん機器で実現できる見通しを得られたが、すき間上部やすき間幅が狭くなるすき間下部が充てんしにくい箇所であることが明らかになった。すき間上部は充てん機器を設計するときに対応策を盛り込むことで、すき間下部はペレットを充てんすることの限界に係わるものであり、すき間自体の形

状を工夫することで解決することができると考えた。今後、実際の充てん機器の試作を行い、新たに想定されるすき間において、同様な充てん実験を行うことで、充てん技術の確立に近づくものとする。

さらに、ベントナイトペレットによって充てんしたすき間領域が、期待される性能を満足できることを確認する研究が、大きな課題として残されている。すき間に充てんされたベントナイトペレットは地下水の浸潤により膨潤し、やがて均質化すると考えられる。これにより施工当初は非常に大きい透水性を示していても時間が経過したのちは難透水性の領域になり、緩衝材の品質を確保する役割を果たすと考えられる。ベントナイトペレットが膨潤したのちの透水係数については、ほぼ期待した透水係数に近い値となることは実験により明らかにされつつあるが、地下水の浸潤過程での状態の変遷などについてはしっかりと取り組むべき重要な課題である。特に流速が速い場では、ベントナイトペレットは緩衝材よりもベントナイトの流亡が多いことも考えられ、このような状態でのベントナイトペレットの特性を把握すること、また対応策の確立などに関する研究を行っていく必要がある。

謝辞

本学位論文は、私が清水建設株式会社に入社以来、継続的に携わってきた放射性廃棄物処分に関する研究開発のうち、高レベル放射性廃棄物における緩衝材周囲のすき間の充填技術に関して行った研究を取りまとめたものである。研究を行うにあたって、また論文をまとめるにあたって、非常に多くの方々にご指導とご助言を頂きました。

岡山大学大学院 西垣誠教授には、大学入学から現在に至るまで公私にわたり、ご指導とご鞭撻を賜りました。大学時代には土質や地下水に関する基礎を授けてくださり、社会人となり放射性廃棄物の研究を始めたあとも、ことあるごとに気にかけて頂き、仕事で一緒にさせて頂く機会では何度も助けて頂きました。

本論文の作成に関しましては、指導教官である西垣誠教授をはじめ、副指導教官の鈴木茂之教授、西村伸一教授にも貴重な時間をさいて、ご指導を頂くとともに助言や激励を頂きました。岡山大学では小松満准教授にも色々と相談に乗って頂き、また貴重な助言を頂きました。研究室においては阿部浩子さん、吉田幸美さんにも、手続きなどで助けていただきました。感謝いたします。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターの朝野英一氏には、受託研究を通じて研究の機会を与えて頂くのみならず、審査論文の投稿に際しては、丁寧な査読や的確なご指摘を頂きました。名古屋大学名誉教授の中村正秋氏、株式会社テクノパウダルトンの門馬恒視氏、上遠野克久氏、株式会社クメタ製作所の萩原英一氏、山崎秀記氏には、ベントナイトペレットの製造に関する研究で、多くの知見をご教示頂くとともに、一緒に苦労して実験データの取得を行って頂きました。ここに記して感謝いたします。

清水建設株式会社では、石井卓氏、吉田順氏、奥野哲夫氏、櫻井英行氏、白石知成氏、齋藤亮氏の技術研究所の方々、戸栗智仁氏、沖原光信氏、矢萩良二氏の土木事業本部の方々とは多くの議論をさせて頂き、協力や助言を得なければ、この論文は完成しなかったです。また、この他の数えきれないの方々にも助けて頂きました。ここに記して感謝いたします。

最後に、暖かく見守ってくれた両親、色々と迷惑をかけた妻と子供たちに心から感謝します。

平成27年3月

中島均