

地層処分場における
地下施設の埋め戻し

(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転写する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

地層処分場における地下施設の埋め戻し

(研究報告)

杉田 裕*, 藤田朝雄*, 棚井憲治*, 長谷川宏**
古市光昭***, 奥津一夫***, 三浦一彦***

要 旨

高レベル放射性廃棄物の処理処分に関しては、最終的には人間の生活圏から隔離することが必要との考え方にに基づき、安定な形態にガラス固化し、30年間から50年間程度の冷却のための一時貯蔵をした後、地下の深い地層中に処分（地層処分）を行うことが基本方針とされている。

処分場を積極的に埋め戻すという概念は地層処分に固有のものである。処分場の地下施設を埋め戻すのは、たとえば人工バリアを設置するために地下深部に掘削された坑道を空間のまま放置しておく、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり、坑道そのものが地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場に求められるバリア性能に有意な影響を及ぼすことが想定されるからである。これらバリアシステムに影響を与える要因を排除するため、廃棄体が定置された後の地下深部に掘削された坑道等は適切に処置しておく必要がある。

廃棄体定置後に残された地下施設を埋め戻す材料を埋め戻し材という。本報告では、埋め戻し材として候補材料の一つである骨材とベントナイトを混合した骨材混合体を対象として検討した。ここでは、混合する骨材として地下施設の建設時に大量に発生するずり（岩盤の破片）を模擬した礫およびケイ砂を用いた。

また、埋め戻しでは必要に応じてプラグやグラウトを設置することとなる。プラグはその機能によってコンクリート材と粘土材が考えられ、グラウトもこれと同様のものが考えられる。

本報告では、埋め戻しの概念、骨材混合体の諸物性、埋め戻し材、プラグ、グラウトの機能、施工法、工程についてとりまとめた。さらに、埋め戻し材、プラグ、グラウトの材料である骨材混合体、コンクリート材および粘土材料ごとに品質管理項目を抽出した。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 本社 2000年レポートチーム

*** 鹿島建設株式会社

Backfilling of the underground facilities on a disposal site

Yutaka SUGITA*, Tomoo FUJITA*, Kenji TANAI*
Hiroshi HASEGAWA**, Mitsuaki FURUICHI***, Kazuo OKUTSU***
and Kazuhiko MIURA***

Abstract

Regarding disposal techniques of high-level radioactive waste (HLW), the HLW is vitrified and then stored for cooling for a period of 30 to 50 years. After cooling, the HLW is isolated in the deep underground. The concept of geological disposal is based on the requirement to enclose the HLW in the deep underground for the long-term durability of the human's environmental safety.

Backfilling of a repository is a unique activity on the geological disposal. If underground tunnels excavated to construct the repository are left, they may have significant influences on the barrier performance of an entire repository, such as: the mechanical stability of a tunnel may be damaged by rock stresses and a tunnel may provide a fast pathway for ground water flow. Therefore, the underground facilities are expected to be backfilled with a backfilling material after emplacement of the HLW and a buffer material.

The material for the backfilling of the underground facilities is backfilling material. In this report, bentonite-aggregate mixture is considered, as one of the candidate materials for the backfilling material. Aggregate imitates the muck that is generated during construction phase of the underground facilities.

The combination of backfilling, plugging and grouting is considered in some underground situations. Plug is composed of concrete material or clay-based one. Grouting material is concrete material or clay-based one, too.

In this report, the concept of the backfilling, mechanical and hydrological characteristics of the bentonite-aggregate mixture, the function, work methods and a schedule of the backfilling materials, plugging and grouting are considered, and items of quality control for the bentonite-aggregate mixture, concrete material and grouting are listed.

* Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works
** Geological isolation research project, Head office
*** Kajima corporation

処分場における地下施設の埋め戻し

目次

1. はじめに	1
1.1 埋め戻しの考え方	1
1.2 埋め戻し材	2
2. 材料物性	3
2.1 骨材混合体の物性	3
2.1.1 透水特性	4
2.1.2 締固め特性	5
2.1.3 膨潤特性	7
2.1.4 強度特性	9
3. 埋め戻しの設計・施工	11
3.1 はらみだしの検討	11
3.2 施工方法	15
3.2.1 処分坑道, 主要・連絡坑道	18
3.2.2 アクセス坑道	19
3.2.3 試錐孔	21
3.3 地上施設	21
4. プラグ	25
4.1 緩衝材の移動・膨出の抑制	25
4.1.1 坑道横置き方式	25
4.1.2 処分孔縦置き方式	30
4.2 透水性割れ目の隔離	32
4.3 地下施設の封鎖	34
5. グラウト	36
5.1 グラウト材	36
5.2 グラウトの施工	38
5.2.1 対策工	39
5.2.2 注土工	40
6. 工程	42
6.1 進捗設定	42
6.1.1 坑道の埋め戻し	42
6.1.2 プラグ施工	45
6.2 埋め戻しの工程	47
7. 品質管理項目	49
7.1 骨材混合体	49

7.2 コンクリート材	51
7.3 グラウト	52
8.まとめ	54
謝辞	54
参考文献	55

図表目次

表 2-1	使用骨材一覧	3
表 3-1	解析に用いた物性値一覧	13
表 3-2	緩衝材のはらみだし量解析結果一覧	14
表 3-3	緩衝材のはらみだしによる諸物性への影響一覧	14
表 3-4	埋め戻し工法比較一覧	16
表 3-5	埋め戻し材の施工方法の組み合わせ例	18
表 3-6	立坑の搬送能力一覧	22
表 3-7	材料貯蔵量一覧	23
表 6-1	坑道形状および延長の一覧	42
表 6-2	作業別能力の一覧	43
表 6-3	作業区分別施工能力の一覧	44
表 6-4	作業別能力の一覧	45
表 6-5	プラグの仮定一覧	46
表 6-6	主要・連絡坑道のコンクリートプラグの工程一覧	46
表 6-7	主要・連絡坑道のベントナイトプラグの工程一覧	47
表 6-8	立坑のコンクリートプラグの工程一覧	47
表 6-9	埋め戻し期間の一覧	48
表 7-1	骨材混合体の品質管理項目一覧	49
表 7-2	締固めに関わる品質管理項目一覧	50
表 7-3	ブロックに関わる品質管理項目一覧	51
表 7-4	コンクリート材に関わる品質管理項目一覧	52
図 1-1	処分場（地下施設）の埋め戻し概念例	1
図 2-1	骨材の粒径加積曲線	3
図 2-2	ベントナイトの混合率と透水係数の関係	4
図 2-3	有効粘土密度と透水係数の関係	5
図 2-4	骨材混合体の締固め曲線	6
図 2-5	ベントナイト混合率と乾燥密度の関係	7
図 2-6	乾燥密度と膨潤応力の関係	8
図 2-7	有効粘土密度と膨潤応力の関係	8
図 2-8	飽和度と一軸圧縮強度の関係（室温）	9
図 2-9	有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係（室温）	9
図 2-10	有効粘土密度と弾性係数の関係	10
図 3-1	緩衝材のはらみだし	11
図 3-2	解析フロー図	12

図 3-3 解析モデル	13
図 3-4 緩衝材のはらみだし量と膨潤圧の変化	14
図 3-5 水平坑道の埋め戻し材の施工要領のイメージ図	19
図 3-6 斜坑の埋め戻し概念図	20
図 3-7 立坑の埋め戻し概念図	20
図 3-8 埋め戻し材製造プラントのレイアウト例	24
図 4-1 緩衝材の膨出の概念図	25
図 4-2 プラグの形式	26
図 4-3 緩衝材の移動・膨出抑制プラグの機能	26
図 4-4 トンネルシーリング性能試験の概要	27
図 4-5 プラグに作用するせん断応力の模式図	28
図 4-6 処分坑道の断面	29
図 4-7 プラグ長に対するせん断応力及び安全率の関係	29
図 4-8 コンクリートプラグの施工手順例	30
図 4-9 キャップの模式図	31
図 4-10 キャップの施工例	32
図 4-11 粘土プラグの設置概念図	33
図 4-12 粘土ブロックの積み上げ	33
図 4-13 粘土プラグの施工要領概念図	34
図 4-14 アクセス坑道孔口のプラグの概念	35
図 5-1 グラウトの種類	36
図 5-2 微粒子ベントナイト (VA) のスラリー溶液の濃度と動粘性係数の関係	38
図 5-3 止水グラウト工法の施工例	39
図 5-4 割れ目に対する粘土グラウト注入試験	40
図 5-5 釜石原位置試験における透水試験結果	41
図 6-1 工程積算のための坑道の埋め戻し作業区分	44
図 7-1 配合設計を進める手順	51

1. はじめに

1.1 埋め戻しの考え方

高レベル放射性廃棄物の処理処分に関しては、最終的には人間の生活圏から隔離することが必要との考え方にに基づき、安定な形態にガラス固化し、30年間から50年間程度の冷却のための一時貯蔵をした後、地下の深い地層中に処分（地層処分）を行うことが基本方針とされている（たとえば、動力炉・核燃料開発事業団，1992）。

処分場を積極的に埋め戻すという行為は、地層処分に固有のものである。地層処分を行うにあたっては、廃棄体（オーバーパックにガラス固化体を封入したもの）、緩衝材等を搬入・定置するためにそれらの搬入路として坑道や、それに付随するさまざまな設備のための空間を地下深部に掘削することが必要になる。このような地下深部に掘削された坑道等を空間のまま放置しておく、地圧の作用により坑道の力学的安定性が損なわれたり、坑道そのものが地下水の卓越した水みちとなるなど、処分場に求められるバリア性能（力学的に安定である、地下水の動きが緩やかである、等）に有意な影響を及ぼすことが想定される。また、地下施設と地上とを直結するような坑道が残置されていると、地下施設と生活圏とを直結する経路になることや、地下施設に人間が不用意に接近することも考えられる。したがって、地層処分システムの全体性能に有意な影響を与える要因を排除するため、地下深部に掘削された坑道等は適切に処置しておく必要がある。

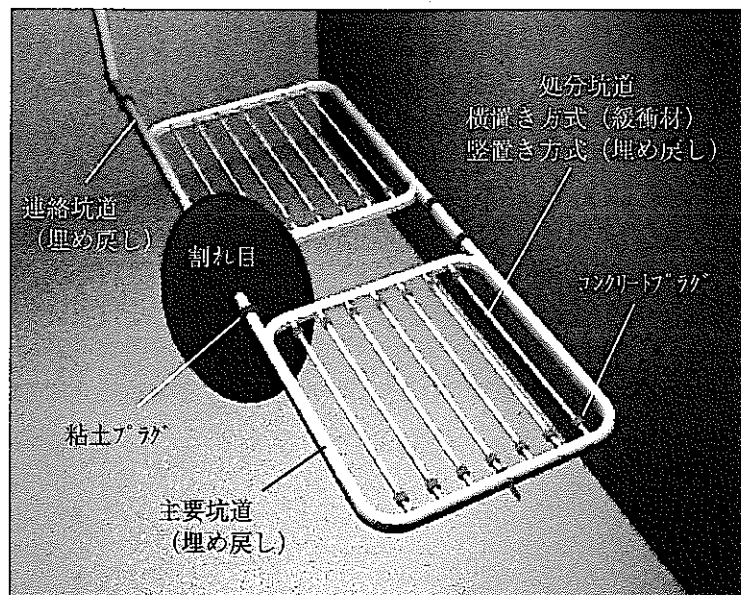


図 1-1 処分場（地下施設）の埋め戻しの概念例

処分場は地上施設と地下施設（地下に掘削された処分坑道，アクセス坑道，主要坑道，連絡坑道等）に大別され，廃棄体が定置された後，地下施設は埋め戻される。図 1-1 は地下施設の埋め戻し概念の一例を示したものである。処分坑道は廃

棄体の定置方式に応じて緩衝材（横置き方式）か埋め戻し材（縦置き方式）で充填する。処分坑道の両端には緩衝材や埋め戻し材のはらみだしを防ぐため、コンクリートプラグを設置する。その他の坑道はすべて埋め戻しの対象となり、坑道と交差する割れ目の規模あるいは岩盤の状況に応じて粘土プラグ、グラウト等を組み合わせる。

1.2 埋め戻し材

地下施設における坑道群の総延長は百数十 km におよび、坑道の掘削の際には大量のずり（岩盤の破片）が発生する。したがって、元の岩盤から発生した材料であることに加えて、材料の調達のしやすさや経済性の観点から、充填材料としてこのずりを利用することが有効であると考えられる。掘削前の岩盤の密度と比較すると坑道に充填するずりの密度には限界があり、元の岩盤と同じ状態に戻すことは困難である。また、透水性に関しても破碎したずりを充填しただけでは岩盤の有する低透水性を確保することはできない。

安全評価の結果によっては、このような材料による埋め戻しも考えられるが、ここでは、坑道内の地下水流動を低減するため、透水性を小さくする目的で低透水性を有するベントナイトを混合した混合材料について検討することとした。また、ベントナイトは水分吸収による膨潤性を有していることから、地下施設の埋め戻し後に地圧の作用等により坑道周辺に新たな割れ目「水みち」が発生したとしても、浸潤してきた水を吸収して自ら膨潤し、その割れ目を充填するといった自己シール機能を期待できる。このような種々の特性を持つように調整した充填材料を「埋め戻し材」と呼ぶ。

埋め戻し材は、処分孔縦置き方式の場合の処分坑道、連絡坑道、アクセス坑道等の埋め戻しに対して適用する。坑道横置き方式の場合には廃棄体の定置時に緩衝材によって処分坑道は充填される。

2. 材料物性

2.1 骨材混合体の物性

埋め戻し材の基本材料となる地下施設の建設時に発生する大量の掘削ずりの物性や組成は、処分場の建設される位置での地質条件に依存し、それに応じて変化することとなる。このため、埋め戻し材の物性を把握するためには、対象となる地質の物性や組成の把握が必要となる。ここではこれらを総合して岩盤の破砕物として捉え、礫およびケイ砂といった骨材で模擬することとした。礫、ケイ砂およびベントナイトの混合物の試料（以下、骨材混合体という）に対して骨材の混合率、密度等をパラメータとして透水特性、締固め特性、膨潤特性および強度特性を取得した（たとえば、動力炉・核燃料開発事業団，1996）。混合したベントナイトは山形県月布産のもの（クニゲル V1）である。

骨材混合体の試験では、土質試験法の定める JGS T 311, 520, 711（地盤工学会，1996）に準拠すると、供試体に混合する骨材の許容最大粒径が試料寸法の 1/5 以下と規定されている。現地発生材の再利用の効率化の観点からは、粒径調整の工程の簡略化のために粒径分布の影響を把握する必要があるが、今回実施した室内試験は土質試験法に則ったものとし、供試体サイズを考慮して骨材混合材に混合する礫及びケイ砂材料の最大粒径は 20mm とした。

表 2-1 使用骨材一覧

材料	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	備考
栃木県産ケイ砂 3号	2.70	
栃木県産ケイ砂 6号	2.68	
栃木県産ケイ砂 3号+5号*	2.70	
愛知県産ケイ砂 7号	2.63	
碎石 2005	2.66	JIS A 5005

*ケイ砂 3号+5号は乾燥重量比で 1対1で混合したもの

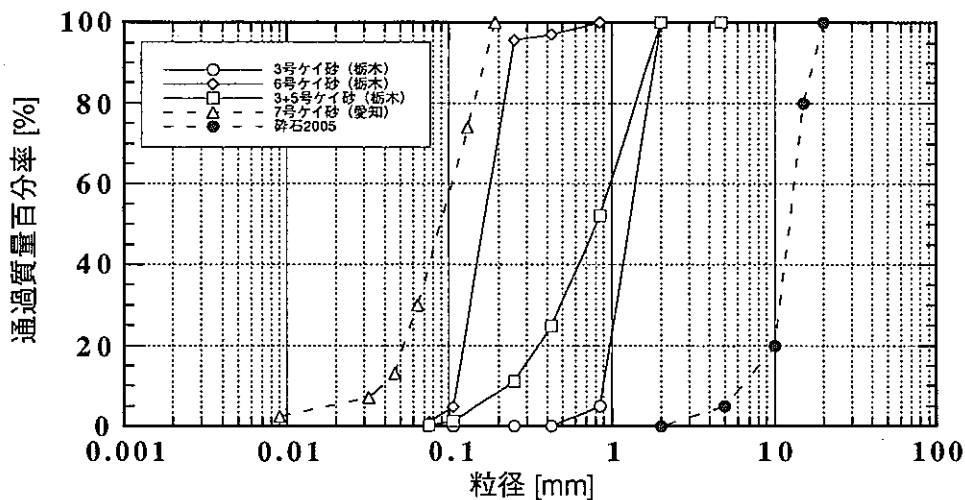


図 2-1 骨材の粒径加積曲線

使用した骨材の一覧を表 2-1 に示す。使用したのは、栃木県産のケイ砂 3 号, 5 号, 6 号, 愛知県産のケイ砂 7 号及び碎石 2005 (JIS A 5005) である。骨材の粒径加積曲線を図 2-1 に示す。諸外国における埋め戻し材の研究では, たとえば Børgesson et al. (1996) の実施したベントナイト混合物の試験がある。ここで用いられた骨材は TBM (Tunnel Boring Machine) の破碎くずであり, 最大粒径は 20 mm である。供試体のベントナイト混合率は 0~30 wt% である。

2.1.1 透水特性

埋め戻し材として用いる骨材混合体の透水特性は, そのまま埋め戻された坑道の透水特性として捉えることができることから, 埋め戻し後の地下水流動に与える影響を把握するために, その特性を取得しておくことが必要となる。骨材混合体の透水特性は透水試験 (動力炉・核燃料開発事業団, 1996; 古市ほか, 1998a, 1998b, 1999; 前田ほか, 1998) で把握した。

ベントナイト混合率と透水係数の関係を図 2-2 に示す。骨材混合体として, 礫+ケイ砂+ベントナイトと礫+ベントナイトの 2 種類について試験を実施した。図は, ベントナイト混合率に着目してまとめたものであり, 乾燥密度は各混合率においてばらついている。図から, ベントナイト混合率の増加に伴って透水係数は小さくなる傾向を示し, その混合率が 15 wt % 程度であれば透水係数は $10^{-11} \text{ m s}^{-1}$ 以下となり, それ以上ベントナイト混合率を増加させても透水係数のオーダーは大きく変化しないことが明らかとなった。また, 各混合率範囲での乾燥密度に関するばらつきはほぼ 1 オーダー以内に収まった。また, この結果はベントナイト混合率 20 wt % で $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ オーダーの透水係数が得られている Komine らの結果 (Komine et al., 1991) とよく一致する。

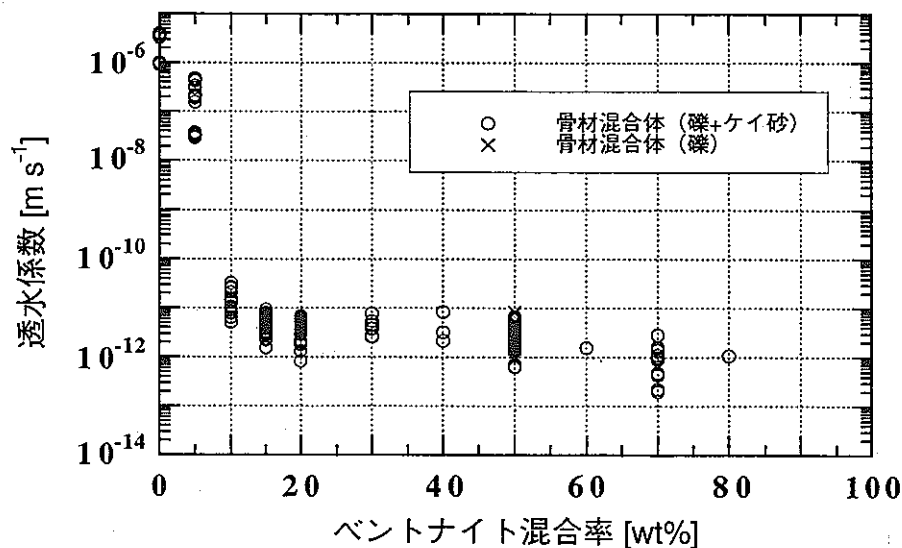


図 2-2 ベントナイトの混合率と透水係数の関係

埋め戻し材の乾燥密度および骨材混合率の影響を包括して透水特性を評価するために有効粘土密度 (Gray et al., 1985) という指標を用いた。これは、骨材混合体内に占める粘土の充填密度を表すものである。有効粘土密度という指標を用いることで、乾燥密度あるいは骨材混合率の異なる供試体での試験結果を直接比較することができる。有効粘土密度を表す関係式は以下のようになる (鈴木・藤田, 1999)。

$$\rho_e = \frac{\rho_d(1 - B_s)}{1 - \rho_d \frac{B_s}{G_s}} \dots \dots \dots (2.1)$$

ここで、 ρ_e は有効粘土密度 [Mg m^{-3}]、 ρ_d は骨材混合体の乾燥密度 [Mg m^{-3}]、 G_s は混合砂等の単位体積あたりの質量 [Mg m^{-3}]、 B_s は混合砂等の混合率 [-] である。

有効粘土密度と透水係数の関係を図 2-3 に示す。図から、透水係数は有効粘土密度に対して反比例の関係を示し、有効粘土密度が 0 から 0.8 Mg m^{-3} にかけては、透水係数は顕著に小さくなる傾向であった。このとき、有効粘土密度が 0.9 Mg m^{-3} 以上であれば、透水係数が $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ オーダーの透水性となることが明らかになった。同時に、それ以上有効粘土密度が大きくなっても透水係数は余り低下しないことが分かった。

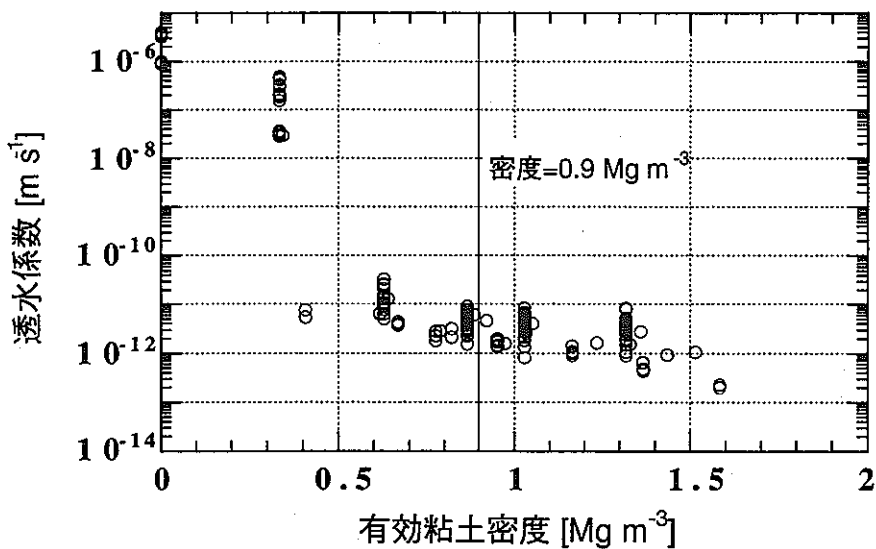


図 2-3 有効粘土密度と透水係数の関係

2.1.2 締固め特性

透水試験の結果から有効粘土密度がある程度確保されれば難透水性を埋め戻し材に求められることが分かった。これは、言い換えるとある程度の乾燥密度が確保できなければ難透水性を期待できないということである。そこで、埋め戻し材

の乾燥密度の確保等，施工性を判断する指標となる締固め特性について，骨材混合体を対象として締固め試験（動力炉・核燃料開発事業団，1996；古市ほか，1998a, 1998b, 1999）を実施した。締固め試験は，モールド内に充填した材料を規定のランマー（錘）で締固める「突固めによる土の締固め試験方法（JGS T 711-1990）」に基づき実施した。

図 2-4 に骨材混合体の締固め特性曲線を示す。図は，礫 50wt%にさらにベントナイトを混合したもの（0～50wt%，残りはケイ砂を混合）の結果を示している。締固め特性では，ベントナイト混合率が 0wt%から大きくなるに従い乾燥密度が大きくなり，ベントナイト混合率が 15wt%のとき，乾燥密度が最大の 2.0 Mg m³ となった。さらにベントナイト混合率が大きくなると，乾燥密度は減少した。これは，礫 50wt%をベースにした場合，礫：ケイ砂：ベントナイトの比が 50：35：15 の組み合わせが最適であることを示している。一方，最適含水比については，得られる乾燥密度が大きくなるに従い小さくなった。最大の乾燥密度が得られるベントナイト混合率が 15wt%の場合，最適含水比は最小の 8.9%となった。

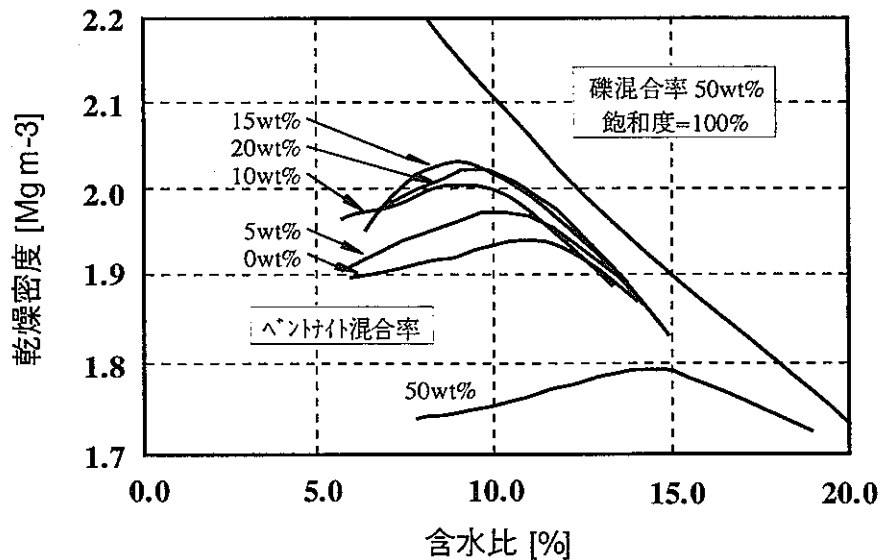


図 2-4 骨材混合体の締固め曲線

ベントナイト混合率と乾燥密度の関係を図 2-5 に示す。図には，最大乾燥密度と有効粘土密度を併記した。図から，最適含水比での締固めで得られた最大乾燥密度はいずれのベントナイト混合率においても 1.5 Mg m³ 以上であり，混合率が小さいと乾燥密度は約 2.0 Mg m³ とより大きい値を得られることが分かった。これを，有効粘土密度で整理すると，ベントナイト混合率が小さいところでは，混合率が大きくなるに従い有効粘土密度は大きくなる傾向であった。しかし，混合率が 60wt% 以上の場合は有効粘土密度はほぼ一定値となった。

ここで，透水係数で 10⁻¹² m s⁻¹ オーダーという低透水性を発揮できる有効粘土密

度 0.9 Mg m^{-3} 以上を確保するためには、ベントナイト混合率を 15wt%以上とすればよいことが分かる。

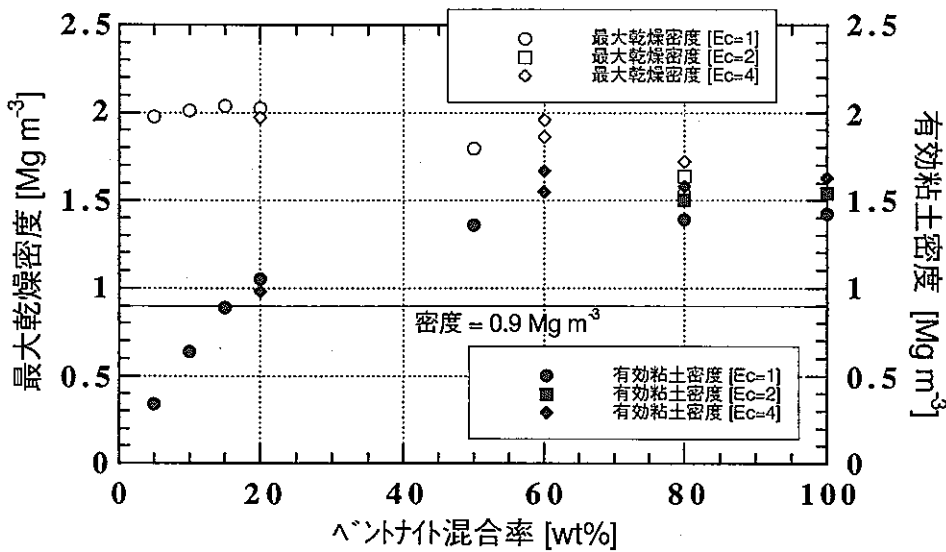


図 2-5 ベントナイト混合率と乾燥密度の関係

また、図中に示す締固めエネルギーを変えた場合の比較では、同じベントナイト含有率において締固めエネルギーを 2 倍 (図中□, ■) あるいは 4 倍 (図中◇, ◆) にした場合でも、若干大きくなるものの得られる乾燥密度には余り変化がなかった。

2.1.3 膨潤特性

埋め戻し材の膨潤特性は、地下施設の埋め戻し後に周辺岩盤の地圧によって変形する坑道の周辺部に新たに発生する割れ目あるいは埋め戻し材をブロックで設置した場合のブロック間等のすきまに対する自己シール機能に関する指標となる。ここでは、骨材混合体の膨潤特性の一つである膨潤応力の測定 (前田ほか, 1998; 古市ほか, 1999) を行なった。ベントナイト混合率をパラメータとした乾燥密度と膨潤応力の関係を図 2-6 に示す。図から、ベントナイト混合率 70wt%において、乾燥密度が大きくなるに従い膨潤応力が大きくなり、その関係を曲線で表すことができる。その他のベントナイト混合率に関しては測定点が少ないため関係が明瞭ではないが、得られた曲線に平行にベントナイトの混合率の順にデータが分布するものとする、その仮想曲線上にデータが乗ってくる。

このとき、ベントナイト混合率が 50wt%と同じであるベントナイト:ケイ砂 (50:50, 図中△) およびベントナイト:ケイ砂+礫 (50:50, 図中▲) の両者はここで得られるベントナイト混合率 50wt%の仮想曲線上に乗ってくる。このことは、骨材の種類よりもベントナイトの混合率が膨潤応力に大きく作用していることを示している。

また、乾燥密度 $1.6 \sim 1.7 \text{ Mg m}^{-3}$ の範囲ではベントナイト混合率が小さくなるに従い膨潤応力は小さくなり、ベントナイト混合率が骨材混合体の膨潤応力に対して影響が大きいことが分かった。

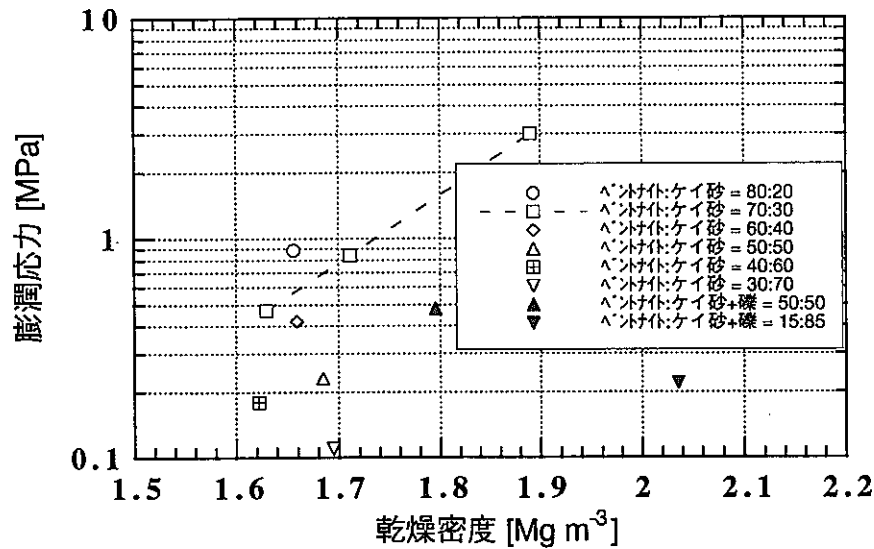


図 2-6 乾燥密度と膨潤応力の関係

骨材混合体の膨潤性に関して有効粘土密度で整理した結果を図 2-7 に示す。図には、緩衝材として検討されているケイ砂混合体の近似曲線（鈴木・藤田，1999）を併記した。図から、今回使用した骨材混合体もこの近似曲線に良く一致することがわかる。低透水性の観点から有効であると考えられる有効粘土密度 0.9 Mg m^{-3} の指標をここに当てはめると、礫-ケイ砂-ベントナイト混合材の関係では膨潤応力は 0.2 MPa 程度となる。

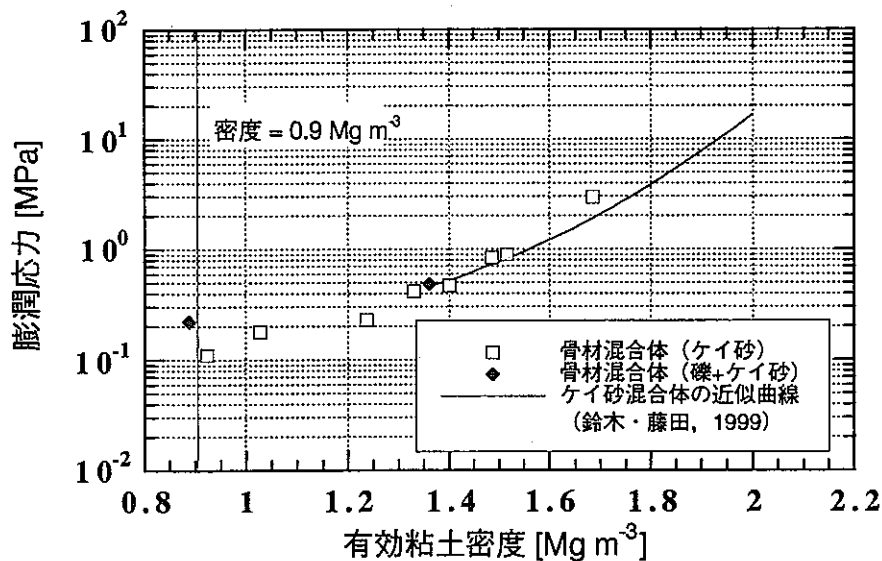


図 2-7 有効粘土密度と膨潤応力の関係

2.1.4 強度特性

骨材混合体は、施工直後やブロック製作時はその条件における強度が見込まれる。しかし、地下水の浸潤が進むと、それともなう間隙水圧の上昇、有効応力の減少により強度が低下すると考えられる。そこで、飽和度をパラメータとして一軸圧縮強度（前田ほか，1998）を求めた。図 2-8 は乾燥密度およびベントナイト混合率を変えた場合の一軸圧縮強度である。図から、いずれの乾燥密度のものも飽和度が高くなると一軸圧縮強度は小さくなっていることが分かる。

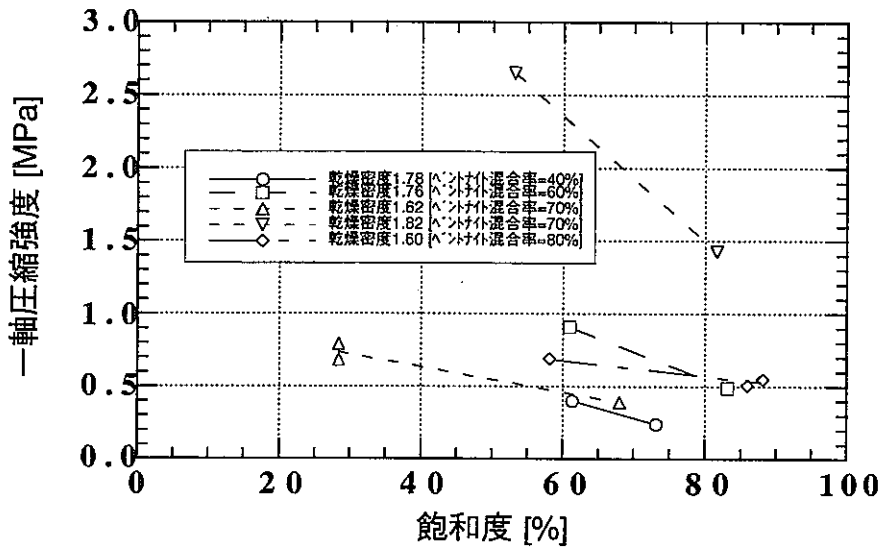


図 2-8 飽和度と一軸圧縮強度の関係（室温）

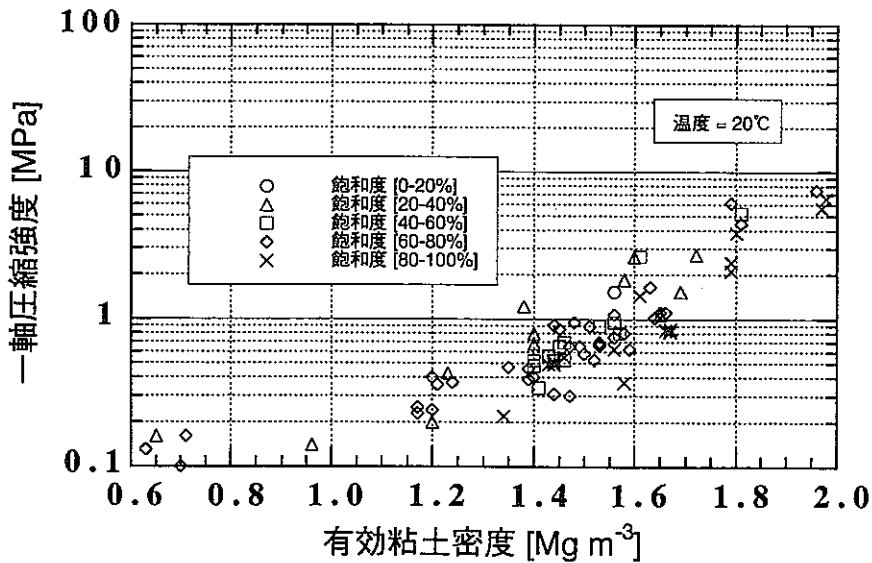


図 2-9 有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係（室温）

有効粘土密度と一軸圧縮強度の関係を図 2-9 に示す。値のばらつきはあるものの、有効粘土密度が大きくなると、一軸圧縮強度は大きくなる傾向であった。値がば

らつく要因として、骨材とベントナイトの固着性、飽和度といったものが考えられる。特に、飽和度の影響に関しては図 2-8 から明らかなように飽和度の増加にともない強度が $1/2$ あるいは $1/3$ と低下している。有効粘土密度で 0.9 Mg m^{-3} の場合では、得られる一軸圧縮強度は飽和度のばらつきを考慮して 0.1 MPa 程度である。

また、有効粘土密度と弾性係数の関係を図 2-10 に示す。一軸圧縮強度と同じように値のばらつきはあるものの、有効粘土密度が大きくなると、弾性係数は大きくなる傾向であった。

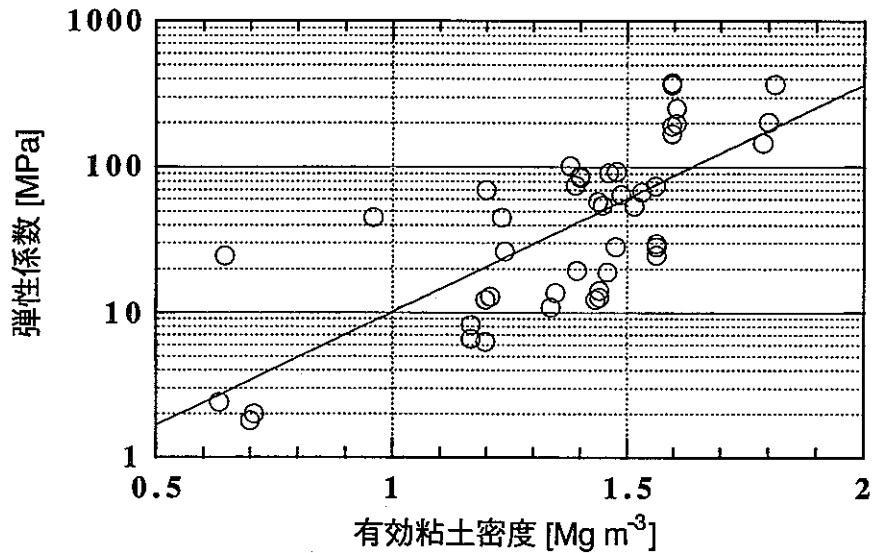


図 2-10 有効粘土密度と弾性係数の関係

3. 埋め戻しの設計・施工

処分場の埋め戻しは、処分坑道に設置された人工バリアに有意な影響を与えないように掘削された坑道を充填することが求められ、設置された緩衝材を所期の状態に維持できるように設計する必要がある。

人工バリアの定置が坑道横置き方式の場合、廃棄体および緩衝材の設置された処分坑道の両端部には4章で述べるコンクリートプラグが設置される。このため、定置初期の緩衝材の品質は処分坑道内という閉空間内において保持されている。一方、処分孔縦置き方式の定置の場合、処分坑道から底面に掘削された処分孔には廃棄体および緩衝材が設置され、処分坑道そのものは埋め戻し材で充填される。緩衝材の設置初期においては4章で述べるキャップが処分孔端部に設置されており、これによって処分孔内の緩衝材の設計密度は満足されている。

しかし、これらコンクリートプラグやキャップに期待される緩衝材を所定の位置に維持するという機能は、処分場の埋め戻し後にはコンクリートの劣化等によりいずれ喪失することとなる。このため、適切な埋め戻し材によって処分坑道が充填されていない場合には、膨潤特性といった物性の違いにより、地下水を吸収して膨潤したより膨潤性の大きい緩衝材が、膨潤性の小さい埋め戻し材で充填されたほかの坑道へはらみだすことが予想される。

3.1 はらみだしの検討

ここでは、埋め戻し材の設計として、処分孔縦置き方式の処分坑道において、緩衝材のはらみだしによる緩衝材の乾燥密度の低下、それによる透水性の変化について検討することとした。

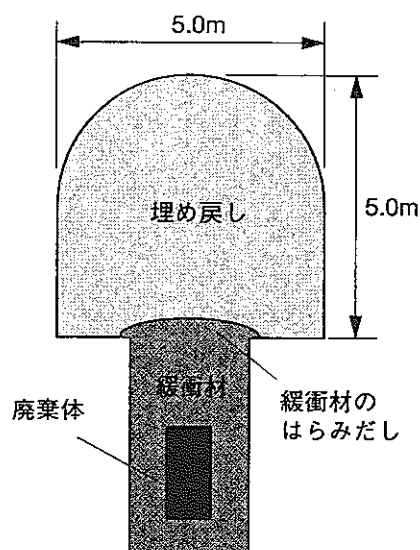


図 3-1 緩衝材のはらみだし

処分孔縦置き方式における緩衝材の定置では、4章で述べるように処分孔孔口にキャップを設置するが、これは埋め戻し材設置までの仮止めとして考えられている。処分坑道の埋め戻しは、処分孔への人工バリアの定置終了後に行われる。このとき、キャップは取り外されたり、そのまま放置される。人工バリアの定置後は、時間の経過に伴い処分孔に地下水が浸潤し、緩衝材は膨潤する。このとき、埋め戻し材の設置乾燥密度が小さい場合、緩衝材の膨潤によって埋め戻し材が圧縮され、図3-1に示すような緩衝材のはらみだしが発生すると考えられる。緩衝材のはらみだしは、その乾燥密度の処分孔内での低下を生じ、緩衝材のもつ透水性の増加、膨潤圧の低下といった人工バリアの健全性に影響を与える要因になると考えられる。このため、緩衝材および埋め戻し材の物性の一例について、はらみだし量の解析・検討を行なった。

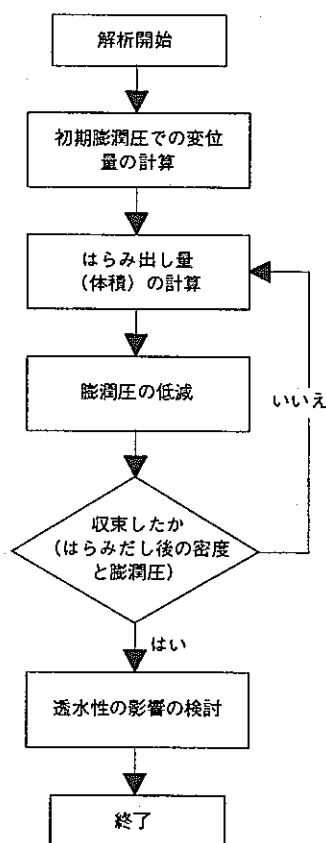


図3-2 解析フロー図

解析は、FEMによる3次元弾性解析とし、緩衝材の膨潤圧による体積変化の影響を把握した。図3-2に示す解析フローにより、緩衝材の膨潤圧によるはらみだし、はらみだしに伴う緩衝材の密度の低下、それによる膨潤圧の低下、それに基づくはらみだし量の見直しの繰り返しの計算を収束するまで実行した。緩衝材および埋め戻し材の挙動は圧密・膨潤の複合現象と考えられるが、直ちに変形するとして

保守的に弾性係数の範囲内での弾性挙動とした。また、緩衝材の再冠水よりも長期にわたるオーバーパックの腐食膨張に関しては考慮していない。緩衝材に比較して埋め戻し材の膨潤圧は小さいことから、膨潤圧が作用しない場合を想定した。

解析に用いた物性値を表 3-1 に示す。埋め戻し材のベントナイト混合率を 15wt% とすると、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} の場合、有効粘土密度は 0.64 Mg m^{-3} 程度となることから、図 2-10 から弾性係数を 3 MPa と設定した。緩衝材の初期の膨潤圧は乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} の場合の緩衝材の有効粘土密度 1.376 Mg m^{-3} に相当する 0.5 MPa とした。この初期膨潤圧を緩衝材と埋め戻し材の境界面に鉛直上向きに作用させた。解析モデルを図 3-3 に示す。

表 3-1 解析に用いた物性値一覧

材料	乾燥密度 (Mg m^{-3})	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
緩衝材	1.6	3	0.4
埋め戻し材	1.8	3	0.4

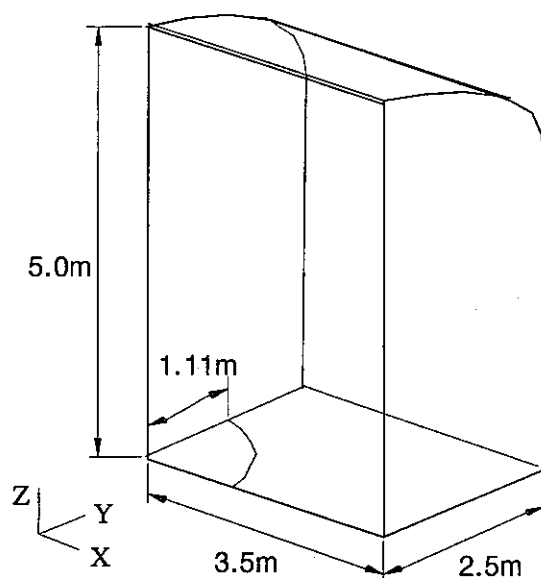


図 3-3 解析モデル

解析結果を表 3-2, 図 3-4 に示す。最初の膨潤圧は 0.5MPa で与え、そのときのはらみだし量は 0.91m^3 であった。ここで、このはらみだし量を考慮した乾燥密度の低下に基づく 2 回目の計算結果は膨潤圧 0.37MPa, はらみだし量は 0.67m^3 であった。3 回目および 4 回目の値は同じであり、これで収束したと判断した。最終的な膨潤圧は 0.38MPa, はらみだし量は 0.69m^3 となった。

この解析結果を考慮すると、はらみだし後の処分孔内の緩衝材の平均乾燥密度は 1.53Mg m^{-3} になる。このときの緩衝材の透水係数は $9.18 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ となり、乾

乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のときの透水係数である $8.09 \times 10^{-13} \text{ m s}^{-1}$ とほぼ同等である（前田ほか, 1998）。緩衝材の乾燥密度、膨潤圧および透水係数の初期値からの変化率を表 3-3 に示す。膨潤圧の低下が 76%と最も大きいですが、その他の物性への影響は小さいものであった。

表 3-2 緩衝材のはらみだし量解析結果一覧

計算回数	膨潤圧 (MPa)	はらみだし量 (m^3)
1 回目	0.50	0.91
2 回目	0.37	0.67
3 回目	0.38	0.69
4 回目	0.38	0.69

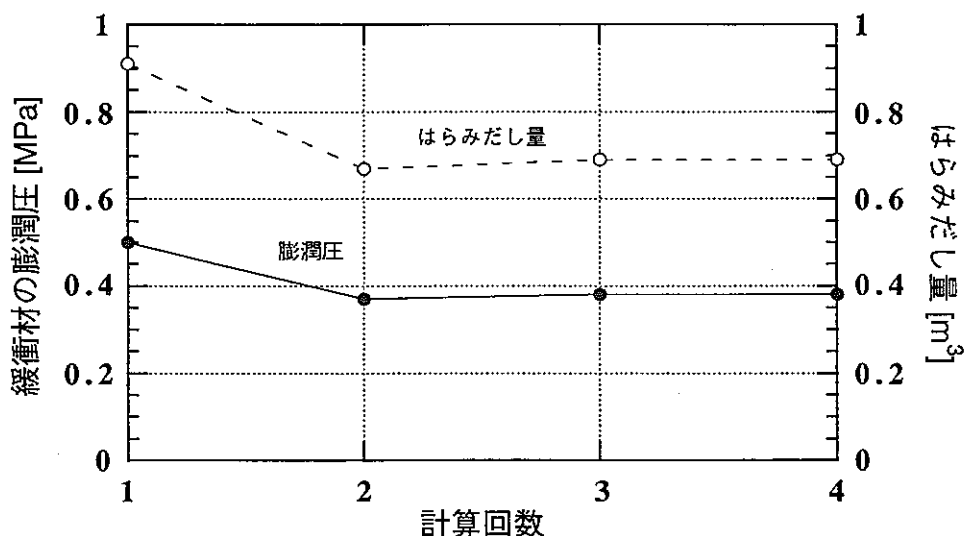


図 3-4 緩衝材のはらみだし量と膨潤圧の変化

表 3-3 緩衝材のはらみだしによる諸物性への影響一覧

物性	初期値	はらみだし後	変化指数 (初期値を 100)
乾燥密度 (Mg m^{-3})	1.60	1.53	95.6
膨潤圧 (MPa)	0.50	0.38	76.0
透水係数 (m s^{-1})	8.09×10^{-13}	9.18×10^{-13}	113.5

本解析で実施した、ベントナイト混合率 15wt%で乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} の埋め戻し材の場合、保守的な結果において緩衝材のはらみだしは認められるもののその量は小さく、それに伴う緩衝材の諸物性への影響はわずかであった。埋め戻し材の詳細設計に関しては、現象をより忠実に取り入れた解析が必要となるが、今回考慮しなかった埋め戻し材の膨潤圧等を考慮することにより、はらみだし量やそ

れに伴う影響は本解析よりも小さくなるものと考えられる。

3.2 施工方法

ここでは、埋め戻し材の設置に関して検討する。人工バリア設置のために建設された地下施設では、操業段階で坑道横置き方式の処分坑道および縦置き方式の処分孔において廃棄体および緩衝材が設置される。その他の坑道は埋め戻し材によって埋め戻される。これら埋め戻し材による坑道の充填は、所定の材料で、設計された乾燥密度で均一に施工されることが望まれる。

人工バリア設置後に埋め戻される坑道内は、設計された厚みを持った緩衝材の放射線に対する遮蔽能力によって廃棄体の放射線が人体に害を及ぼさない程度に抑えられていることから、施工機械等の運転を直接人間が行うものとする。

埋め戻しの材料は、基本的には 2 章で検討した埋め戻し材であるが、安全評価によって地層処分システムの全体性能に有意な影響を及ぼさないことが確認されれば、ベントナイトを混合しない材料あるいはセメント系材料が用いられることも考えられる。このため、これらの材料に関しても施工方法に関しては検討した。施工方法の一覧を表 3-4 に示す。ここでは、ブロック、まきだし・締固め、吹付け、横締固め、流動体の工法について示した。各工法の特徴を以下に示す。

① ブロック工法

ブロック工法では、ブロック運搬車によって運ばれたブロックをブロック設置車によって所定の位置に設置する。ブロックの場合、設置時にブロック間に隙間が生じるため、吹付けなどにより隙間を充填する。この工法は、坑道の上半下半いずれにおいても施工可能である。

② まきだし・締固め工法

まきだし・締固め工法では、骨材混合体運搬車によって運ばれた材料をブルドーザなどのまきだし機械によってまきだし、振動ローラなどの転圧機械で締固める。この工法は、坑道下半の締固めに適していると考えられ、締固め機械の能力に応じて施工密度を確保することができる。上半に関しては機械の機高により締固め範囲が制限される。

③ 吹付け工法

吹付け工法では、骨材混合体運搬車によって運ばれた材料を吹付け機に投入し、吹付けロボットのブームにより吹付け位置を変えながら吹付ける。この工法は、坑道の上半下半関係なく施工することが可能であるが、吹付け機の圧送力および材料の状態によって吹付け後のリバウンドなどが考えられ、求められる施工密度を確保できるかどうかの判断が重要となる。

表3-4 埋め戻し工法比較一覧

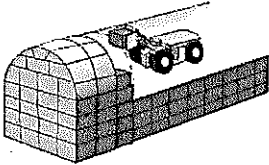
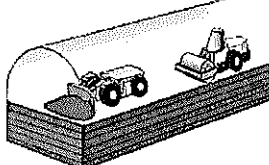
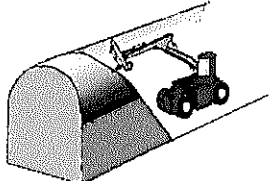
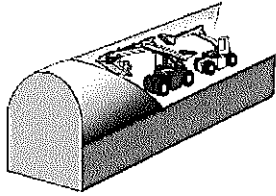
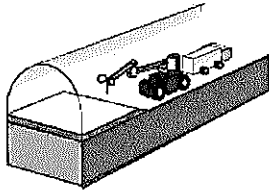
形態/工法	施工機械		備 考		
			上半	下半	その他
<p>ブロック</p> 	ブロック運搬車	坑内のブロック運搬を行う。 既に設置された埋め戻し材を乱さないようタイヤ式走向機構により走行する。	可	可	<ul style="list-style-type: none"> 吹付け装置との組み合わせが必要 ブロック製造プラント(地上)が必要
	ブロック設置車	ブロックの把持後、設置位置にブロックを移動後設置する。 ブロックを把持する把持機構、設置位置に移動する昇降・横移動機構、ブロックを把持機構から設置位置に押し込むプッシュ機構より構成される。			
	その他機械	ブロック間、ブロックと岩盤間の隙間に骨材混合体を吹付ける吹付け機が必要。			
<p>まきだし・締固め</p> 	骨材混合体運搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を運搬する。	不可	可	<ul style="list-style-type: none"> 施工機械の機高により施工範囲が決定する。 ただし、側壁近傍の締固めは人力による。 その他の施工法との組み合わせが不可欠
	まきだし機械	タイヤブルドーザにより骨材混合体をまきだす。			
	転圧機械	振動ローラによる転圧締固めを行う。			
<p>吹付け</p> 	骨材混合体運搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を運搬する。	可	可	<ul style="list-style-type: none"> 単独で可能 必要な密度等の品質が確保できるかの確認試験および吹付け機械の開発が必要
	吹付け機	ポンプ部へのフィーダ機構、ポンプ機構を有する吹付け機を下記吹付けロボットに搭載し、骨材混合体を吹付ける。			
	吹付けロボット	吹付け機から供給された骨材混合体を吹付け機のロボットのアーム・ブーム起伏・旋回機構により位置決めし、トンネル全断面を埋め戻す。			

表3-4 埋め戻し工法比較一覧 (つづき)

形態/工法	施工機械		備考		
			上半	下半	その他
横締固め 	骨材混合体運搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を運搬する。	可	可	<ul style="list-style-type: none"> ・単独で可能 ・横方向締固め機械の開発が必要
	骨材混合体供給機	運搬車から骨材混合体を受け取り、横締固め機の投入ホッパに供給する。			
	横締固め機	ホッパから受け取った骨材混合体を横締装置部に供給するコンベア機構、横締機構、横締機構を移動する旋回・起伏機構により混合体を供給しながら振動により締固める。			
流動体 (セメント系材料) 	材料運搬車	セメント系材料を地上で練り混ぜ、坑内はアジテータ車で運搬する。	可	可	<ul style="list-style-type: none"> ・単独で可能 ・パッチャーラフト(地上)が必要
	打込みポンプ	運搬車から受け取ったセメント系材料は、打込みポンプにより打込みパイプ内を圧送する。			
	ディストリビュータ	ポンプにより打込まれたセメント系材料を一定の層厚になるようパイプ吐出口を移動する。			

④ 横締固め工法

横締固め工法では、骨材混合体運搬車によって運ばれた材料を、骨材混合体供給機によって横締固め機のホッパに投入する。ホッパの材料は締固め位置に送りだされ、先端に振動盤を装備した締固め機械により締固める。この工法は、空洞断面に対して斜めに連続して締固めを行うことができることから、坑道の上半下半いずれにも施工が可能である。また、締固め機械の能力に応じて施工密度を確保することができる。

⑤ 流動体工法

流動体工法では、アジテータなどの材料運搬車で運ばれた材料を、打込みポンプ内に圧送し、所定の位置に打設する。この工法では、材料が流動体であるため、設置側の形状に関係なく、また、坑道の上半下半を問わず施工することができる。

3.2.1 処分坑道、主要・連絡坑道

埋め戻しの対象となる処分坑道は処分孔縦置き方式の定置の場合であり、坑道は、ほぼ水平坑道である。また、主要・連絡坑道も処分パネルの周囲に配置されることから、処分坑道と同様にほぼ水平坑道である。これら水平坑道の埋め戻し方法としては、表 3-4 に示した工法から、表 3-5 に示すような組み合わせ例が考えられる。それぞれの組み合わせに対して表中に示すように特徴があり、坑道内の状況に応じて工法を適宜選択することができる。このうち、下半部まきだし締固め、上半部ブロック+吹付けの組み合わせの施工要領のイメージを図 3-5 に示す。

表 3-5 埋め戻し材の施工方法の組み合わせ例

下半分	まきだし・締固め			横締固め
上半分	ブロック+吹付け	吹付け	横締固め	横締固め
判定	上半分の品質保持に有効である。ブロックおよび坑道環境の管理が重要である	骨材混合体が仕様の通りの品質で施工できるかが課題。	施工機械の実績が少ないが、機械の開発、品質の確認ができれば合理的な方法	施工速度の面で通常のまきだし・横締固めより有利であることが確認されれば適用可能

これらの施工技術の実績としては、以下に紹介するようなものがある。直径 5m の TBM 掘削坑道の埋め戻しを実施した Gunnarsson et al. (1996) の試験では、坑道下半分においてまきだし・締固め、上半分において横締固めを採用した。下半分に用いた振動ローラーは道路舗装等に用いられるものであり、上半分に関しては既存の掘削・積込み機械の先端部に締固め用の振動盤等を取り付けた締固め機械を使用した。振動ローラーでは乾燥密度 1.74 Mg m^{-3} (ベントナイト混合率

20wt%) , 1.97 Mg m^{-3} (ベントナイト混合率 10wt%) を達成し、横締固めでは乾燥密度 1.59 Mg m^{-3} (ベントナイト混合率 30wt%) , 1.7 Mg m^{-3} (ベントナイト混合率 20wt%) , 1.91 Mg m^{-3} (ベントナイト混合率 10wt%) を達成した。

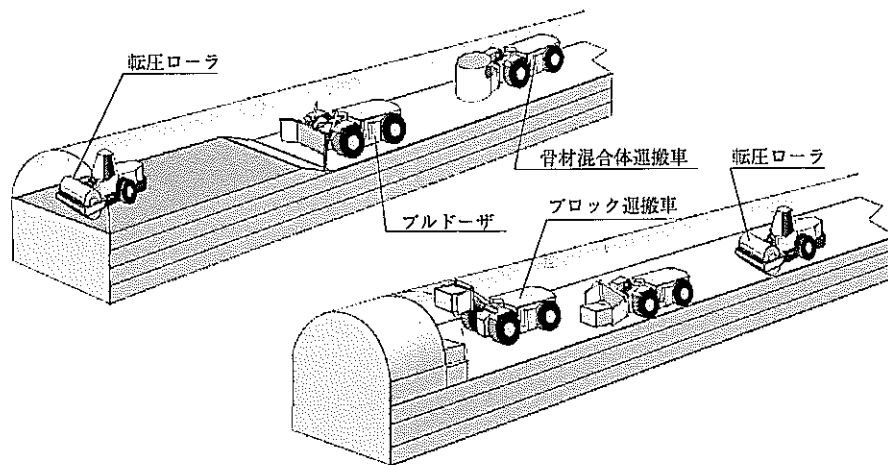


図 3-5 水平坑道の埋め戻し材の施工要領のイメージ図
(下半部；まきだし・締固め, 上半部；ブロック)

大きな締固めエネルギーを得られるまきだし・締固めと締固めエネルギーが小さい他の方法を組み合わせる場合は、坑道内における密度のばらつきを少なくするため、何らかの対策が必要になる。これらの対処法の一つとして、充填密度が小さくなる坑道天端部に高圧縮ベントナイトあるいは固形化したベントナイトペレット等を充填する方法 (Börgesson, 1998) が考えられている。

サイクル機構はこれまでに吹付け工法の施工性について、模擬岩盤を用いた基礎試験 (杉田ほか, 1995) を実施した。吹付け工法では、最適含水比以上の含水比の範囲において、コンクリート吹付け機による埋め戻し材の吹付け作業が可能であることが確認できた。吹付けにより得られた埋め戻し材の乾燥密度は、 $1.0 \sim 1.5 \text{ Mg m}^{-3}$ の範囲であったが、さらに転圧機により締固めを行うことにより、 $1.5 \sim 1.7 \text{ Mg m}^{-3}$ 程度の乾燥密度を得ることができた。

カナダとの共同研究で実施している「トンネルシーリング性能試験」 (藤田・杉田, 1998) では、プラグ周りにおいて埋め戻し材の施工法として「まきだし+転圧」および「吹付け」を行っている。

3.2.2 アクセス坑道

(1) 斜坑方式によるアクセス坑道の埋め戻し

斜坑方式のアクセス坑道の埋め戻しにおいては、基本的には前節で記述した埋め戻し技術要素を適用することができる。斜坑方式の場合はある程度の勾配を有していることから、坑道天端部近傍の鋭角となる部分の作業性に工夫が求められるものの、坑道の上半下半といった区別をすることなく、連続して埋め戻しを行

うことが可能であると考えられる。このような埋め戻しにおいては、坑道の形状に合わせて柔軟な対応が可能な図 3-6 に示すようなまきだし・締固め工法および横締固め工法の組み合わせが有効と考えられる。

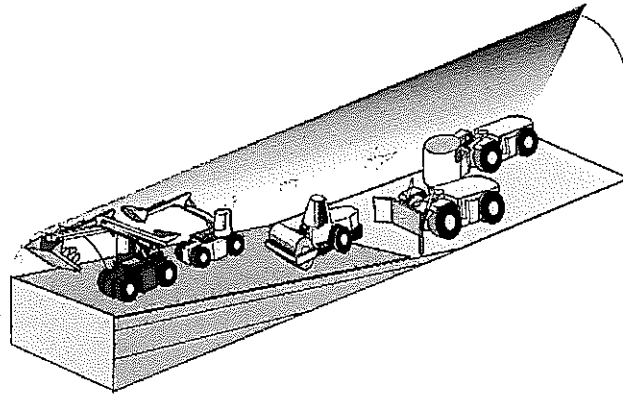


図 3-6 斜坑の埋め戻し概念図

(2) 立坑方式によるアクセス坑道の埋め戻し

立坑方式のアクセス坑道の埋め戻しは重力方向の締固めが容易であることから、立坑下部より順次締固めて施工していく方法が有効である。工法としてはまきだし・締固めが考えられる。埋め戻し要領のイメージを図 3-7 に示す。

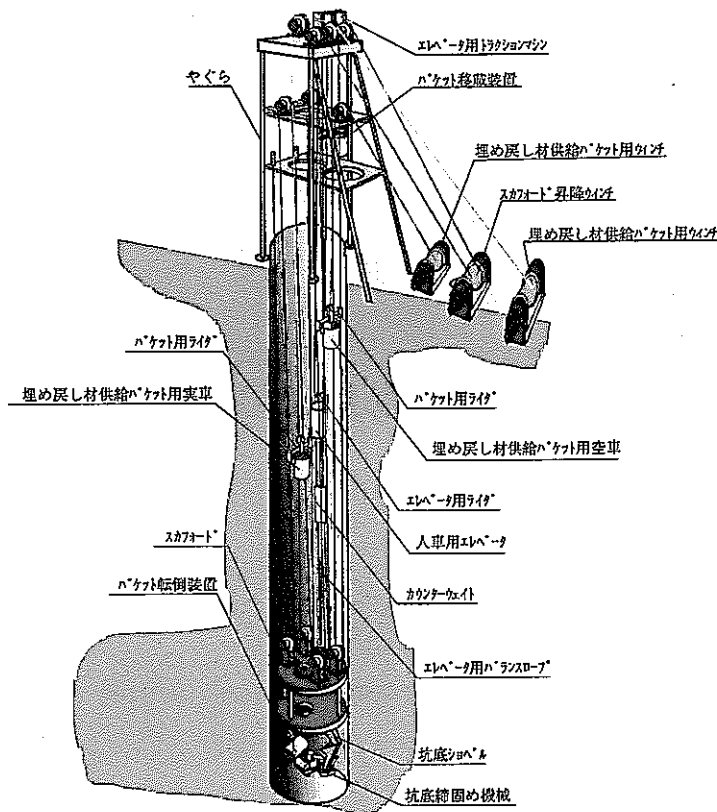


図 3-7 立坑の埋め戻し概念図

埋め戻し材の運搬はやぐら、ウィンチ、ワイヤーケーブル、スカフォード等で構成される昇降装置によりバケットにて行う。立坑坑底部まで運搬された埋め戻し材はバケット転倒装置によりまきだされ、スカフォードに取り付けられた坑底ショベルにより敷き均しを行い、搭乗式振動ローラおよびハンドガイド振動ローラを用い締固める。ここで用いるハンドガイドローラは、主に搭乗式振動ローラでは締固めが不十分となる端部に用いる。

3.2.3 試錐孔

試錐孔は、その役割によって処分場建設当初から長期にわたって使用するものもあり、その方向も鉛直孔、斜孔、水平孔とさまざまである。地表からの試錐孔は地下施設と短絡する水みちに、坑道内からの試錐孔についても新たな水みちとなりえることが想定される。そこで、これらの試錐孔は適切に処置する必要がある。

これまでの試錐孔の埋め戻しに関する実績として、ストリッププロジェクトで行われたボアホールプラグ (Fairhurst et al., 1993) やグリムゼル試験場における試錐孔閉鎖試験 (Blümling, 1997) 等がある。ボアホールプラグは、試錐孔より一回り小さいベントナイトブロックを備えた孔あきのパイプを試錐孔内に装填し、地下水を吸収して膨潤したベントナイトで試錐孔を充填するものである。試験の結果からベントナイトを充填した区間の透水係数は周囲の岩盤よりも低くなることが確認されている。

また、試錐孔閉鎖試験は、パッカーで区切られた試錐孔の試験区間内にベントナイトを固化したペレットを圧縮空気で注入し、試錐孔を充填するものである。ペレットで充填された試錐孔の止水性能は、その充填区間内では試錐孔そのものが選択的な水みちとならないことが確認されている。

止水孔の閉鎖に関しては、孔全体において均一に止水性が確保されることが必要となると考えられるが、このような長孔における止水性を確保する充填法に関しては実績がない。坑道の埋め戻しとは異なり、試錐孔内における作業スペースが確保できないことから、パッカーシステムを併用した段階的な充填等、確実に埋め戻すことができる充填工法の確認が必要である。

3.3 地上施設

埋め戻しは、廃棄体の定置方式によっては数百 km にも及ぶ坑道を対象とすることから、大量の材料を必要とする。そのため、円滑な埋め戻しの施工を実施するために地上において埋め戻し材のプラントを必要とする。埋め戻し材の施工における材料の輸送能力は立坑の稼働効率により制限される。ここでは、立坑の稼働効率を想定し、それに基づくプラントを設計した。ここでは、坑道掘削時の大量のずりが骨材として適切でなかった場合も考慮して、外部より材料を調達する場合について、円滑な埋め戻しの施工を行うために必要と考えられる粒度調整され

た材料の貯蔵といった材料の確保を中心に検討した。

(1)立坑の搬送能力

立坑は図 3-7 に示す設備により行うこととする。埋め戻し材の搬入設備はスキップ方式であり、2 基のバケットを吊り込み用ワイヤロープの両端に取り付け、つるべ式に交互に上下させることにより材料を投入する。立坑の直径は 6.5m である（棚井ほか，1999）ことから、バケットの容量を 4.5m³ 級とした。表 3-6 に搬送能力の計算条件および計算結果を示す。計算式は

$$Q = (2 \times 3600 \times q_0 \times k \times f \times E) / Ct \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

である。記号は、表 3-6 に示すものを表す。これより、立坑 1 本あたりの輸送能力は深度 500m の場合、37.8m³/h、深度 1,000m の場合、22.4m³/h である。

表 3-6 立坑の搬送能力一覧

条件	記号		単位
運転深度(500m)	d	520	m
運転深度(1000m)	d	1020	m
スキップ積載要領	q ₀	4.5	m ³
間口	b	2.5	m
奥行き	w	2	m
高さ	h	2	m
引上げ	v	200	m/min.
終端における速度低減係数	vc	25	-
スキップバケットの積込係数	k	0.95	-
作業効率	E	0.75	-
土量換算係数	f	0.9	-
計算結果			
サイクルタイム(500m)	Ct	550	s
サイクルタイム(1000m)	Ct	926	s
搬送能力(500m)	Q	37.8	m ³ /h
搬送能力(1000m)	Q	22.4	m ³ /h

(2)埋め戻し材製造プラント

ここでは、前述の計算結果に基づき、以下の条件を加えて地上施設における埋め戻し材の製造プラントの容量を検討した。

- ・埋め戻しとして立坑は 2 本利用する。
 - ・製造設備のメンテナンス、機械トラブル等を考慮して施工能力に 50%の余裕を見込む。
 - ・材料貯蔵能力は運搬時の安全性を考慮して 5 日分の貯蔵量を確保する。
- 立坑 2 本を用いたときのそれぞれの深度における搬入能力は、50%の余裕を見込

んで 110m³/h (500m) , 70m³/h (1000m) となる。この搬入能力の材料を調整するため、2.5m³/バッチの 2 軸強制練り型ミキサーを導入する。ミキサーの攪拌効率は 50%として必要台数を求めた。1 バッチあたり 2 分間で強制練り混ぜると、それぞれ深度 500m の場合 3 台、1000m の場合 2 台で材料を練り混ぜることができる。

$$\text{深度 } 500\text{m} ; 3 \times 2.5 \times 30 \times 0.5 = 112.5\text{m}^3/\text{h} > 110\text{m}^3/\text{h}$$

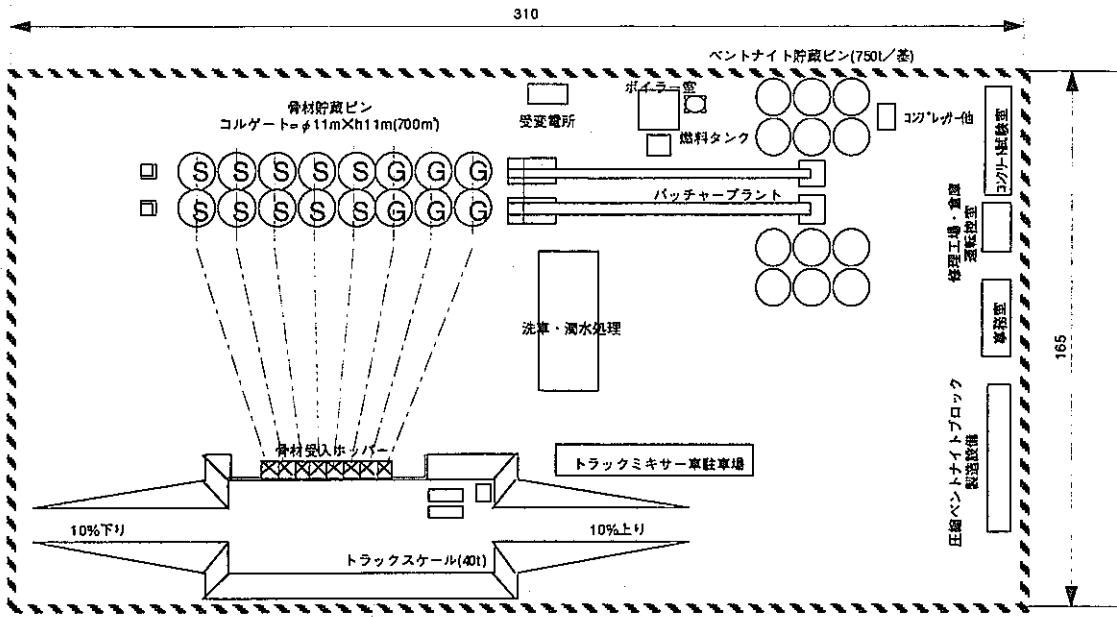
$$\text{深度 } 1000\text{m} ; 2 \times 2.5 \times 30 \times 0.5 = 75.0\text{m}^3/\text{h} > 70\text{m}^3/\text{h}$$

求められた材料の貯蔵量の一覧を表 3-7 に示す。材料の貯蔵は一般的なコルゲートライナーによる直立円筒型のサイロ方式とし、骨材受入れ設備およびミキサープラントの間にベルトコンベアーを設置する。

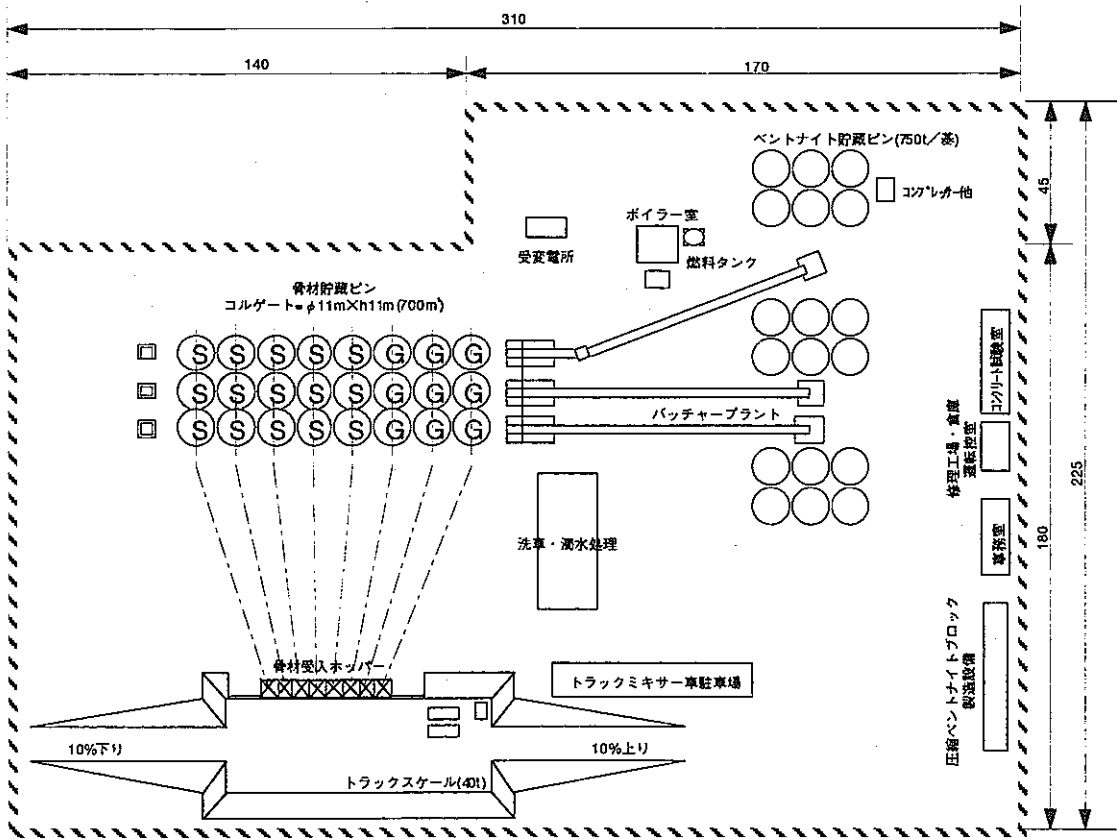
表 3-7 材料貯蔵量一覧

深度	区分	種別	貯蔵量
500m	骨材	粗骨材	6,000 m ³
		細骨材	9,400 m ³
	ベントナイト		13,100 ton
1000m	骨材	粗骨材	4,000 m ³
		細骨材	6,300 m ³
	ベントナイト		8,700 ton

埋め戻し材の貯蔵プラントのレイアウト例を図 3-8 に示す。図中、上は深度 1000m の場合のレイアウト例、下は深度 500m の場合のレイアウト例である。



埋め戻し材製造設備レイアウト (深度1000m)



埋め戻し材製造設備レイアウト (深度500m)

単位 (m)

図 3-8 埋め戻し材製造プラントのレイアウト例

4. プラグ

プラグは、その用途に応じて大きく二つの機能に分けることができる。一つは、処分坑道内あるいは処分孔内に設置された緩衝材の移動、はらみだし（以下、膨出という）を抑制するもの、もう一つは、坑道が水みちとなりえる大規模な割れ目と交差する場合にその割れ目を隔離するものである。

4.1 緩衝材の移動・膨出の抑制

人工バリア形成のために定置された緩衝材は膨潤性の材料であることから、時間の経過とともに浸潤した地下水により膨潤することが予想される。この緩衝材の膨潤性による自己シール機能は人工バリアを健全に維持するために不可欠な重要な機能の一つであるが、この膨潤性のために考慮しなければならない事象が生じる。

4.1.1 坑道横置き方式

人工バリアの定置方式が坑道横置き方式の場合、処分坑道に続く主要・連絡坑道が開放されていると、膨張した緩衝材は主要・連絡坑道へと膨出すると考えられる。このような緩衝材の膨出が発生すると、緩衝材に対して必要な充填密度を確保できなくなる。また、図4-1のように一旦膨出した緩衝材を再度所期の充填密度に設置し直すことは、緩衝材の密度低下の程度・範囲の把握、機能低下部分の緩衝材の取出し、緩衝材の再設置等を考慮すると容易なことではない。

このような事象を未然に防ぐための方策の一つとして、処分坑道の両端部にプラグを設置することが考えられる。このプラグには緩衝材の移動、膨出を防止する能力を求めるわけであるが、そのためには地下水の浸潤によって生じる緩衝材の一時的な膨潤応力に耐えうるだけの強度が必要となる。この場合はコンクリートプラグが適切である。

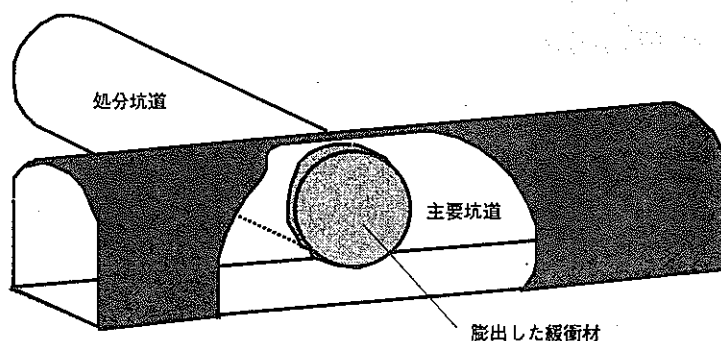


図 4-1 緩衝材の膨出の概念図

図 4-2 にプラグの形式を示す。スレートプラグは周囲の摩擦力で外力に抵抗するものである。また、キープラグは切欠き（キー）部前面の押し抜きせん断抵抗と

周囲の摩擦力で抵抗する方式である。これより、外力に抵抗する観点では、切欠きがある方式が有効であると考えられる。

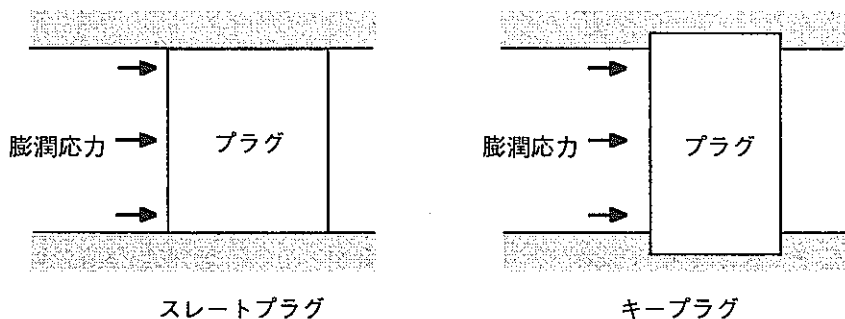


図 4-2 プラグの形式

(1)コンクリートプラグ

緩衝材の移動・膨出の抑制のためのプラグの機能の概念図を図 4-3 に示す。人工バリアは、処分坑道一本に着目した場合、処分坑道の奥から順番に手前に向かって設置される。一本の処分坑道における緩衝材の設置には長くて数年を要するため、初期に設置された緩衝材は地下水の浸潤により膨潤することが予想される。図中のプラグ 1 はこの膨潤応力に耐え、緩衝材の移動・膨出防止を目的とするため、緩衝材の施工前に設置される。また、坑道一本分の廃棄体および緩衝材の定置が終了後、プラグ 2 を設置する。

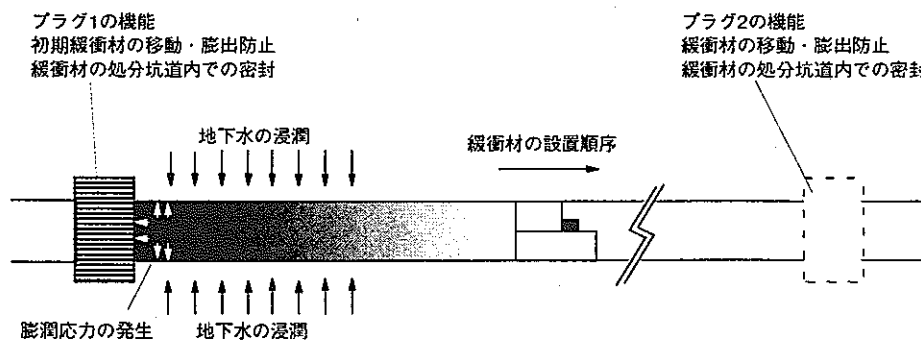


図 4-3 緩衝材の移動・膨出抑制プラグの機能

処分場が埋め戻された後は、プラグが耐圧機能を喪失しても坑道全体が埋め戻し材で充填されており、緩衝材の坑道内での顕著な移動・膨出は発生しないものと考えられる。

圧力を受けるプラグとしては、石油地下備蓄における貯蔵タンクの遮蔽（蒔田他, 1991）、圧縮空気貯蔵発電システムにおける貯蔵タンクの遮蔽（土木学会, 1997）、廃鉱山における坑道の閉そく（金属鉱業事業団, 1984）等で実績があるが、これ

らはいずれもコンクリートプラグを採用している。

コンクリートプラグの材料となるセメント系材料はベントナイトとの接触を考慮して低アルカリ性セメントが候補材料として考えられる。低アルカリ性コンクリートの研究開発に関しては、コンクリートプラグを基本としているカナダにおいて進められており、Gray・Shenton (1998) は LHHPC (Low-heat high performance concrete) によって圧縮強度 70MPa (28 日材令), pH が 10.6 (25 度, 90 日材令, 通常のコンクリートは pH12.5 以上) という結果が得られることを示している。

カナダで実施している図 4.4 に示すトンネルシーリング性能試験 (藤田・杉田, 1998) では、低アルカリ性コンクリートのプラグが施工されている。この試験は、処分坑道を想定した坑道の両端部に LHHPC プラグおよびケイ砂混合体高圧縮ブロックプラグを設置し、プラグ間の圧力チャンバーから試験区域周辺の水圧と同等の 4MPa を作用させて、プラグを中心としたシーリングシステムの性能に係わる各種データを取得するものである。坑道の形状は周辺応力を考慮した空洞安定解析の結果から横に扁平の楕円の形状とし、長辺 (幅) が 4.375m, 短辺 (高さ) が 3.5m である。

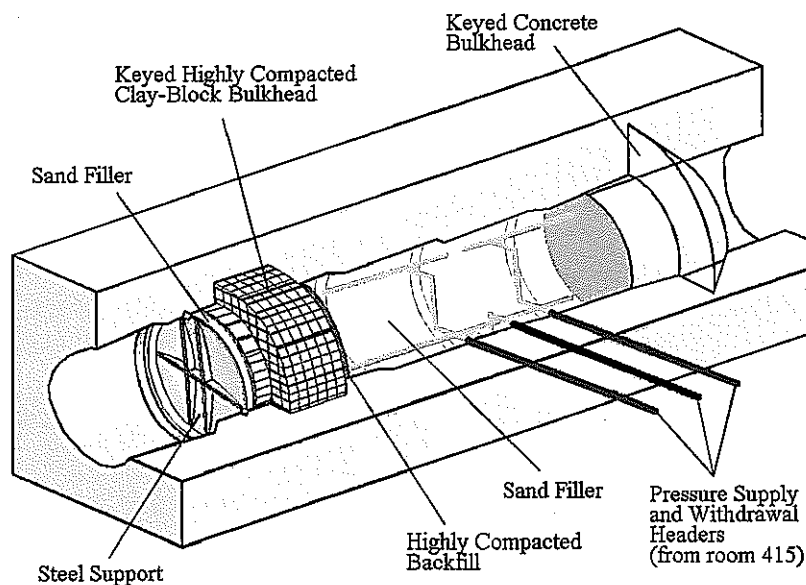


図 4-4 トンネルシーリング性能試験の概要

このほか、プラグの材料としてブロック状に成形した岩石ブロックを用いる岩石系材料、鋼製の隔壁といった金属材料のものが考えられる。金属材料の施工例としては、同じくカナダの試験で粘土プラグの移動、膨出を抑制するために金属製の隔壁を設置している。また、コンクリートプラグの施工としては、実坑道での埋め戻し材の施工試験の端部へのアーチ状のプラグの設置がスウェーデンの HRL プロジェクト (Börgesson, 1998) において計画されている。

(2) プラグの施工

コンクリートプラグは緩衝材の一時的な膨潤応力に耐えるように設計することが求められることから、セメントの種類、骨材の種類および強度（一軸圧縮強度、せん断強度等、これらは配合比等によって管理される）等に配慮する必要がある。セメント系材料のプラグはコンクリート構造物となり、設計基準に関しては土木学会から出されているコンクリート標準示方書（土木学会，1996a）が準用できる。

ここで、プラグの強度設計に関して、既存の設計法を参考として図 4-5 に示すように全断面に膨潤応力が掛かることによる押し抜きせん断と仮定してプラグの成立性を検討した。コンクリートの許容せん断応力は 0.9MPa としてプラグに作用する仮想せん断面の安全率を以下の式により求めた。

$$F = 0.9 / \tau \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$\tau = \sigma A / L B$$

ここで、

- F ; 安全率 [-]
- τ ; プラグに作用するせん断応力 [MPa]
- σ ; 緩衝材の膨潤応力 [MPa]
- A ; 坑道径相当のプラグの断面積 [m²]
- L ; 坑道径相当のプラグの周長 [m]
- B ; プラグ長 [m]

である。

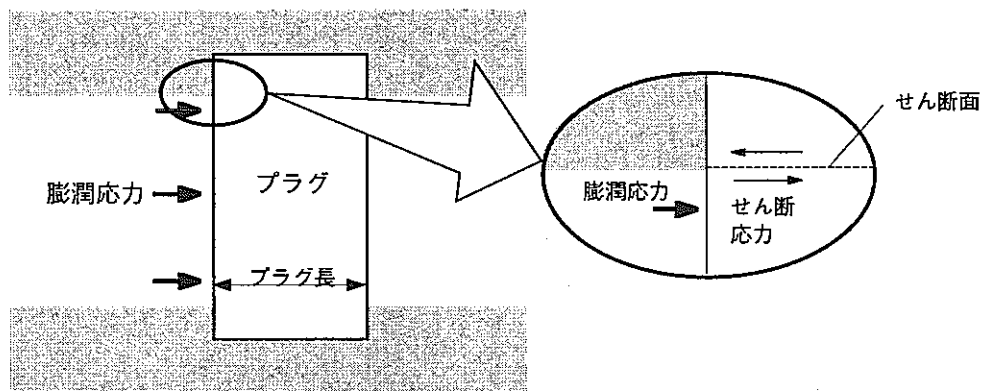


図 4-5 プラグに作用するせん断応力の模式図

処分坑道の断面（黒木ら，1999）を図 4-6 に示す。横置き方式の場合は硬岩，軟岩とも同じ内径の形状であり，縦置き方式の場合は硬岩の方が内径が大きい。そこで，坑道断面積および坑道内外周はより大きく，作用する膨潤応力の大きくなる硬岩の寸法で計算した。

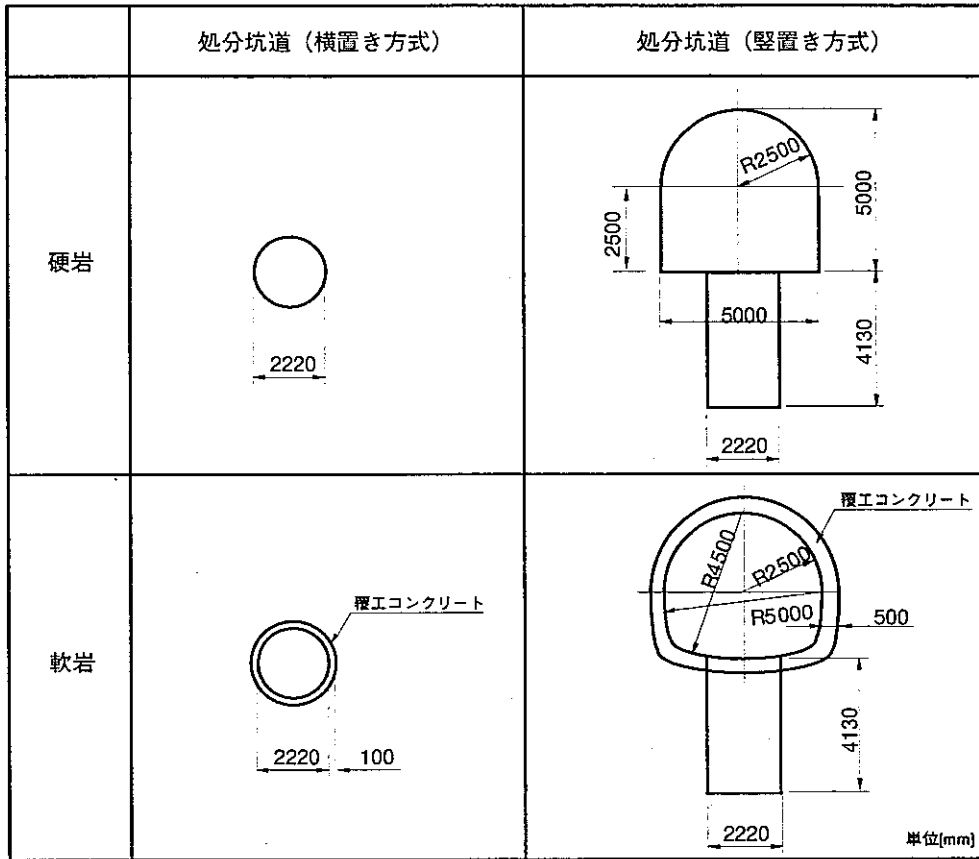


図 4-6 処分坑道の断面（黒木ら，1999）

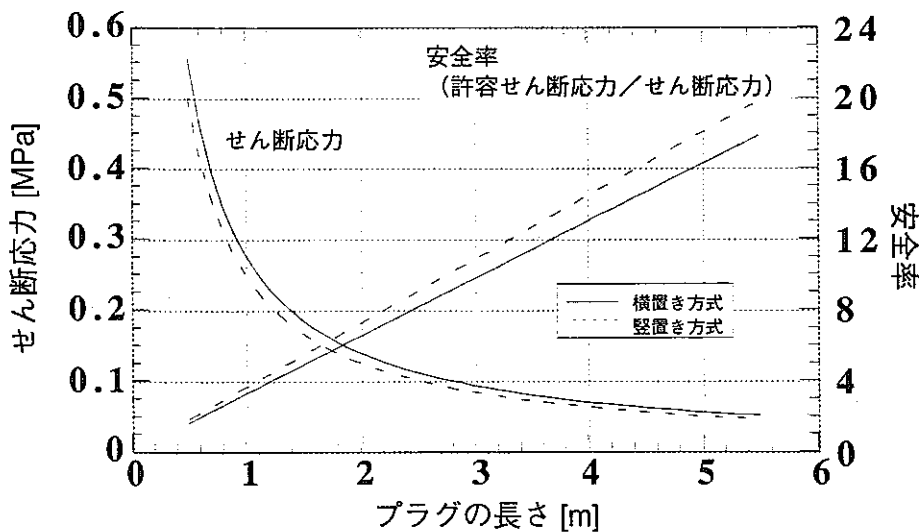


図 4-7 プラグ長に対するせん断応力及び安全率の関係

仮想せん断面におけるせん断応力と安全率の関係をプラグ長をパラメータとして図 4-7 に示す。図から、坑道横置き方式及び処分孔縦置き方式いずれの坑道形状の場合でもプラグ長をある程度長くすることでせん断応力は小さくなり、安全率が大きくなることから緩衝材の膨潤応力に十分耐えることができると考えられる。

豎置き方式の場合は、処分坑道に設置されるのは緩衝材よりも膨潤性の小さい埋め戻し材であり、さらに安定性は大きくなると考えられる。

また、コンクリート標準示方書の中で、水中あるいは絶えず浸潤状態にあるコンクリートの圧縮疲労強度は気乾状態のコンクリートのその2/3程度であることが述べられており、地下深部の処分場の環境はこのような状態であると考えられることから、強度の設計において留意が必要である。

プラグそのものは緩衝材の膨潤応力に耐えられたとしても、切欠きの設計が岩盤や掘削影響領域の状態を考慮したものでなければ、プラグそのものの機能を十分確保できないことが考えられる。このため、切欠きの設計ではプラグを設置する部分の坑道周辺の掘削影響領域の範囲、岩盤の力学的強度等を考慮して、適切な大きさ、形状等を設定する必要がある。この切欠きを拡幅するためには、坑道壁面に支保工が施工されている場合は、空洞の安定を確保するためにセメントグラウトの注入等により周辺岩盤を補強（土木学会，1979）し、支保工を撤去することが必要となる。前述のトンネルシーリング性能試験のコンクリートプラグの設計では、3次元FEM解析により切欠き深さ1.75mの円錐形と設定している。

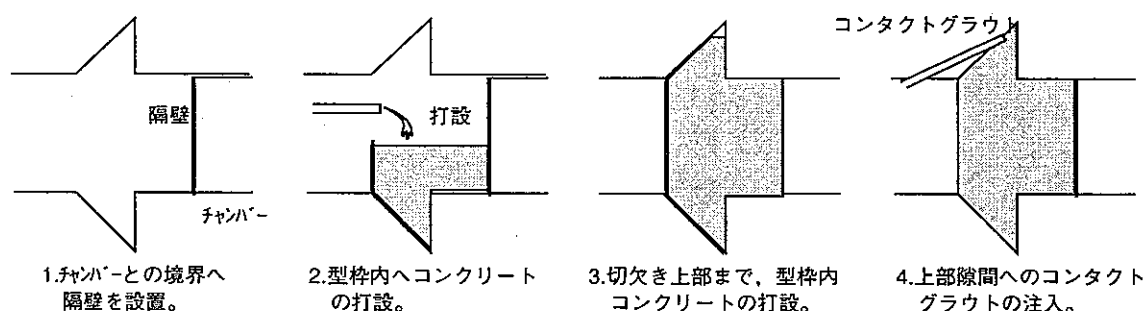


図 4-8 コンクリートプラグの施工手順例

(トンネルシーリング性能試験におけるコンクリートプラグ)

コンクリートプラグの施工法としては、コンクリートを流し込むための型枠を作成してコンクリートを流し込む。コンクリートの硬化の過程で、コンクリートの収縮により上部に隙間が生じる可能性がある。隙間が生じた場合には、コンクリートの固結後に無収縮モルタル、膨張コンクリートあるいはセメントミルク等を注入し、隙間を充填する必要がある。図 4-8 にカナダのコンクリートプラグの施工手順を示す。ここでは、プラグ上部の隙間充填としてコンタクトグラウトを実施した。

4.1.2 処分孔豎置き方式

処分孔豎置き方式の場合、処分孔の配置される処分坑道は埋め戻し材で充填され、処分孔には緩衝材および廃棄体が定置される。横置き方式の場合は緩衝材の定置とコンクリートプラグの定置が同じ時期であったが、豎置き方式の場合は、

処分孔に緩衝材が定置された後、時間差をおいて処分坑道への埋め戻し材の設置となる。埋め戻し材を設置した後の処分坑道は横置き方式と同様の考え方にに基づき、必要に応じて処分坑道の両端をコンクリートプラグで密封することとする。これは、処分坑道の埋め戻しと主要坑道の埋め戻しに時間差があり、緩衝材と比較するとベントナイトの混合率の差から膨潤応力は小さいものの、埋め戻し材も膨潤性を有していることから、埋め戻し材の移動・膨出が起これると考えられるからである。この場合のコンクリートプラグは、横置き方式と同じ考え方で設計・施工する。

(1) キャップ

処分孔に設置された緩衝材の膨潤応力は、乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} とすると、約 0.5 MPa である。処分孔上部が開放されている場合、処分孔に設置された緩衝材に地下水が浸潤すると膨潤し、処分坑道に膨出すると考えられる。処分坑道の埋め戻しまでは、このような緩衝材の膨出を抑える必要があるため、緩衝材設置後処分孔上部に、キャップを設置する事が考えられる。キャップの固定方法として、図 4-9 に示すようにロックボルト方式あるいは坑道天盤支持方式等が考えられる。

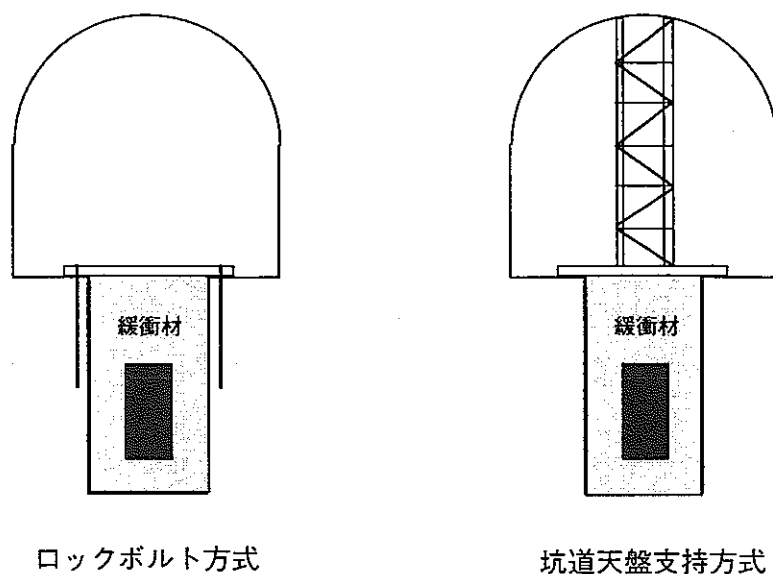
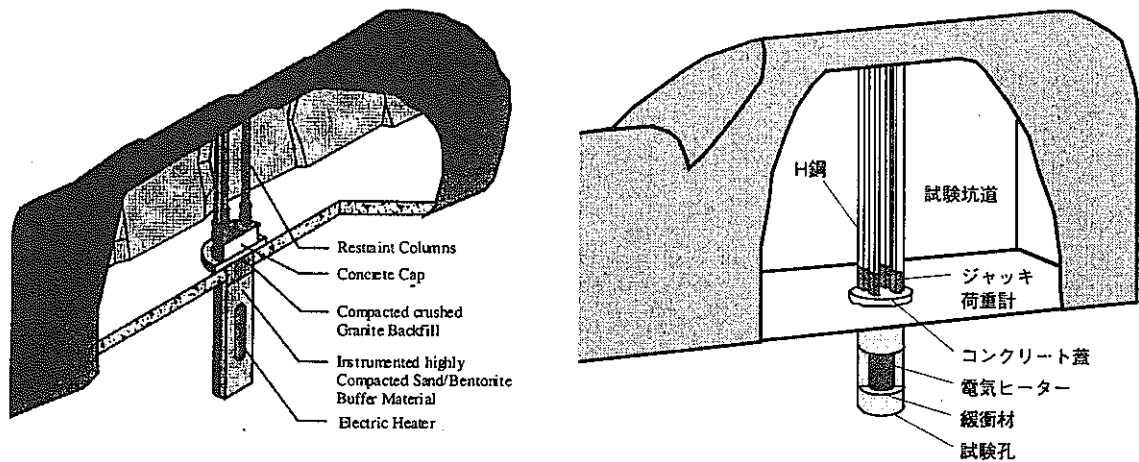


図 4-9 キャップの模式図

このキャップは、処分孔への緩衝材の設置から処分坑道の埋め戻しまでの一時的に設置されるものであり、埋め戻し時には簡易に取り外しが可能なことが望ましい。キャップに作用する緩衝材の膨潤圧相当（乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} で 5 MPa ）の荷重は約 200 トンであり、ロックボルトでこれを固定する場合、相当数の本数を必要とする。また、この方式の場合は、埋め戻し材の設置に支障がないことから埋め戻し時にキャップを残置することも考えられるが、処分孔周囲の岩盤に損傷を与えるため、人工バリアの健全性の観点からは望ましくない。

一方、天盤支持方式の場合は、支持部材の座屈を考慮する必要がある。これは、鋼材を組み合わせるにより十分に荷重に耐えられる支持材を設置することができる。この方式の場合、処分坑道の埋め戻し時に支持材を撤去することが必要となるが、処分孔周囲の岩盤を損傷する心配がない。このような緩衝材の膨潤に対する支持材の設計は、図 4-10 に示すようにバッファ/コンテナ試験 (Kjartanson, 1993) や粘土充填・熱負荷試験 (核燃料サイクル開発機構, 1999) における実績がある。



Buffer/Container Experiment

粘土充填・熱負荷試験

図 4-10 キャップの施工例

4.2 透水性割れ目の隔離

湧水量の多い割れ目は地下施設の建設・作業時にそれぞれの作業に支障のない程度に適宜止水対策が施されるが、このような対策の効果は一時的なものであり、長期においてはその機能が低下し、いずれ水みちになると考えられる。このような水みちは、設置された緩衝材や埋め戻し材を流出させ、バリア性能に影響を与える可能性がある。そこで、このような流出の原因となると考えられる割れ目は埋め戻し時に適切に止水性の材料により処置することが必要となる。

(1) 粘土プラグ

上述のような処置の必要な割れ目は、止水性能に優れ、長期にわたって変質等の少ない粘土プラグで挟み込むようにすることが有効と考えられる。図 4-11 に示すように、まず割れ目自体に粘土系のグラウトを注入して割れ目を充填する。そして、その割れ目を高圧縮成形した粘土ブロックのプラグで挟み込む。このプラグはシール機能に優れている必要があることから、高い膨潤性を発揮できるように埋め戻し材よりもベントナイトの混合率が高く、乾燥密度も大きいものとしたほうが有効である。

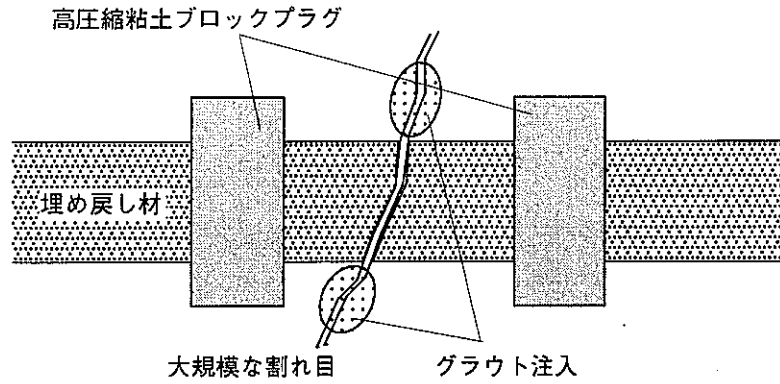


図 4-11 粘土プラグの設置概念図

粘土プラグの施工実績は、前述のトンネルシーリング性能試験がある。深さ 1.0m の切欠き、拡幅幅 2.0m に、ケイ砂混合率 30wt%、乾燥密度 1.8 Mg m^{-3} のブロック（平均の大きさ $35.5 \times 10.5 \times 16.5 \text{ cm}$ 、質量 11kg）を図 4-12 に示すように積み上げ、プラグを施工した。

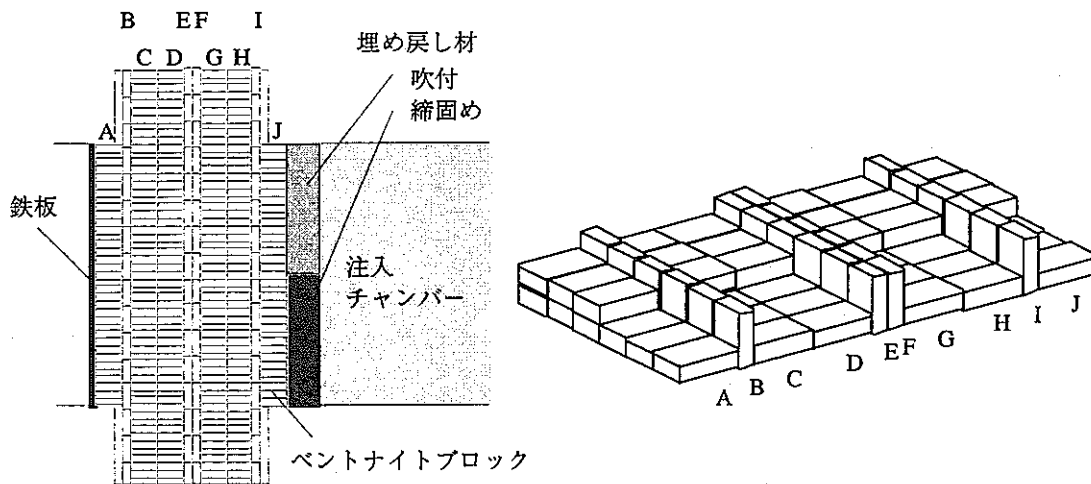


図 4-12 粘土ブロックの積み上げ

ブロックは、注入チャンバーからの水の浸潤に対してブロック内に直線的な流路を形成することのないように縦置き（図中の B, E, F, I）と横置き（図中の A, C, D, G, H, J）を組み合わせた。プラグの拡幅部は、ラインドリリングおよび削岩により実施したため拡幅後の表面は凸凹であった。そこで、同じ材料のケイ砂混合体を表面に吹付け、平滑にした。この吹付けでは、最大 1.4 Mg m^{-3} の乾燥密度が得られた。

トンネルシーリング性能試験では、プラグの施工は人力により一つずつブロックを置いて完成させた。これは、試験プラントであることから各種計測用のセンサーを埋設するためブロックサイズを小さくしたためであるが、処分場における

施工は機械の導入によって大型のブロックが使われると考えられる。図 4-13 に大型ブロックの場合の施工概念を示す。

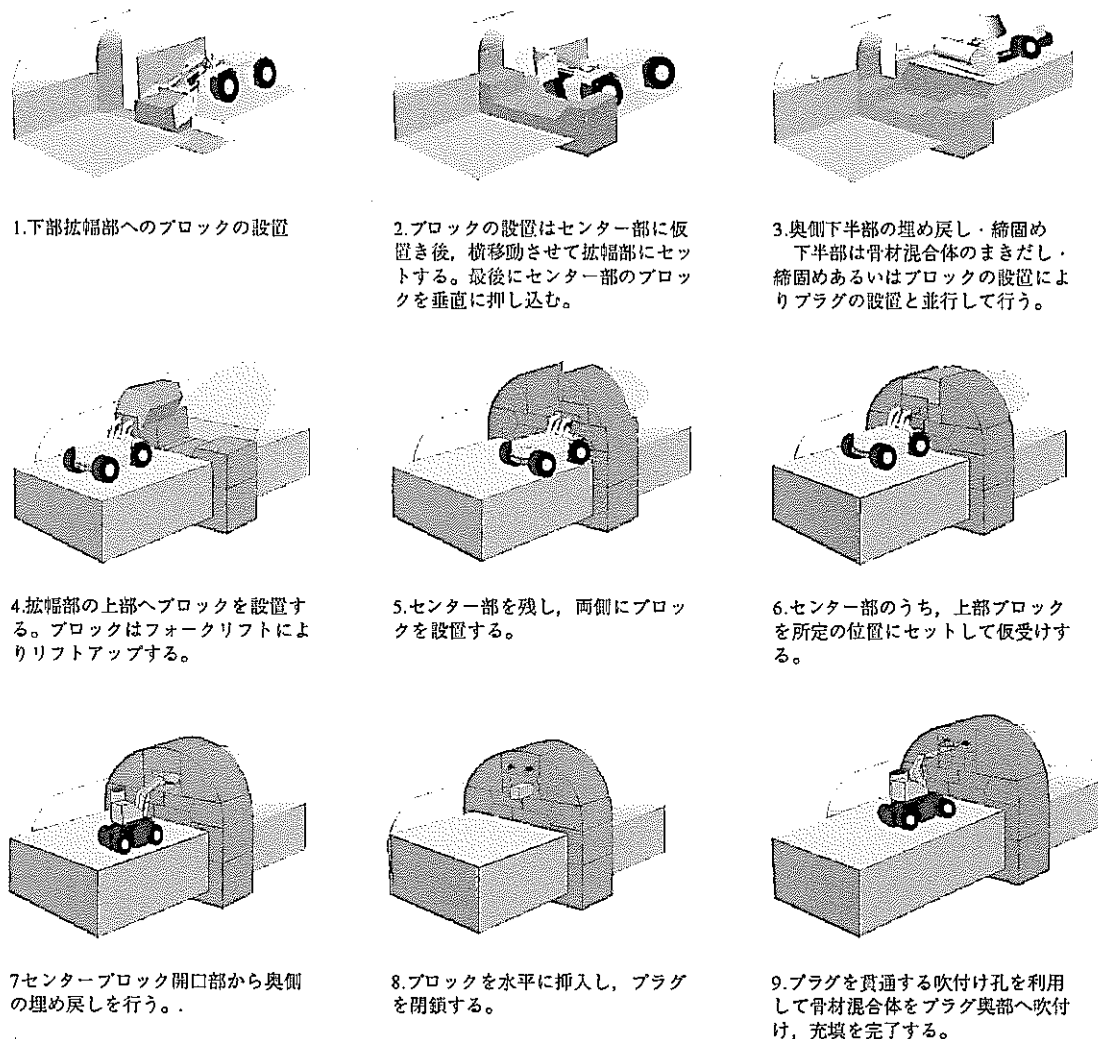


図 4-13 粘土プラグの施工要領概念図

ブロックはプラグ拡幅部の下部からブロック設置車によって設置する。拡幅部側方への設置はセンター部に仮置したブロックを横移動させる。拡幅部の上部については、フォークリフトを用いてブロックを所定の位置へリフトアップする。拡幅部へのブロックの設置に引き続き坑道内部のブロックの設置を行う。全てのブロックを設置した後、ブロック間の隙間にケイ砂混合体を吹付け機で吹付ける。

4.3 地下施設の封鎖

埋め戻しが終了した後、アクセス坑道の坑口には、人間の不用意な侵入を防ぐために、プラグを設置する。同じようなものとして、廃鉱山における坑道の閉そく（金属鉱業事業団，1984）がある。鉱山の閉そく用プラグは鉱害防止策として

廃鉱山からの漏水に着目して設計される。これらは耐水圧性が求められるコンクリートプラグである。プラグの概念図を図 4-14 に示す。

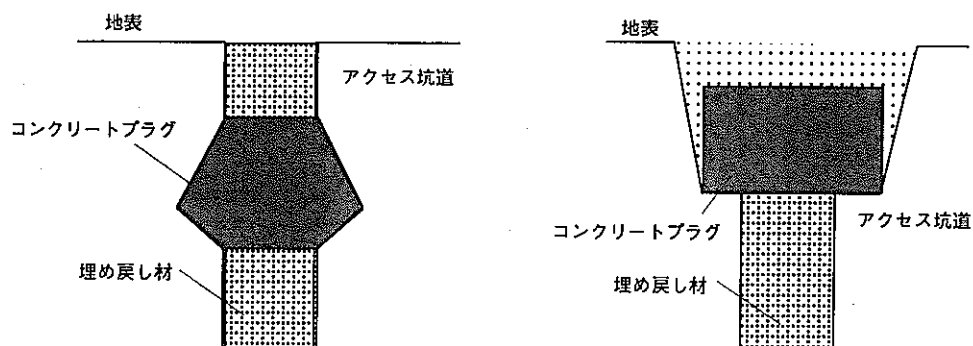


図 4-14 アクセス坑道孔口のプラグの概念

5. グラウト

地層処分におけるグラウトは、その機能により二つに分類することができる。一つは、処分場の建設あるいは操業時に湧水が認められた場合に、廃棄体の設置、緩衝材の施工といった処分場での作業性を損なわないように湧水を制御するために実施する対策工である。もう一つは、埋め戻し後において再び地下水の流動経路となると考えられる大規模な割れ目や岩盤とコンクリートプラグのすきまといったものを適切に充填するために実施する注入工（前者は粘土系、後者はセメント系）である。

5.1 グラウト材

グラウトの種類は、図 5-1 に示すようにセメントモルタル系、粘土系、薬液系に分けることができる。薬液系はさらに水ガラス系および高分子系というように細分化されるが、高分子系のもは地下水環境への影響が確認されたため、1974 年 7 月以降は緊急用の場合を除いて使用が制限されている。

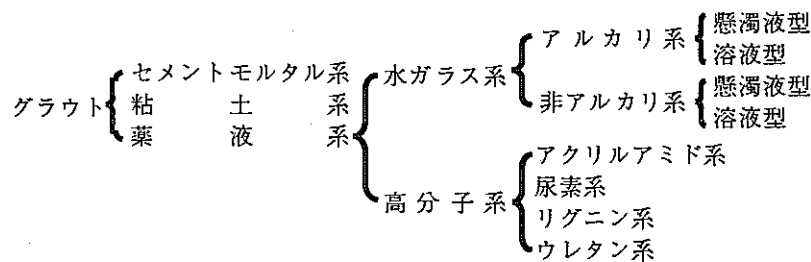


図 5-1 グラウトの種類（土質工学会，1982）

グラウトの材料としては、セメントモルタル系のもは、固結主成分にセメントを用い、各種の添加剤を加えるものが考えられる。割れ目内にて比較的早期に固結して強度を期待できることから施工対象も湧水の止水対策が主目的となる。粘土系のもは、それ自体長期にわたり安定なものである。粘土粒子は割れ目内に浸潤して目詰まり効果を生ずることにより岩盤を低透水性に改良することができる。水ガラス系のもは、ゲル化したものがアルカリ性を示すアルカリ性のもは、中性を示す非アルカリ性のもがある。水ガラス系の材料では硬化剤や遅延剤の種類を適当に選択することにより、硬化時間を数秒から数十分と変えることができる。

セメント材のグラウトに関しては、これまでに普通ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュセメント、早強セメント、コロイドセメントおよび超微粒子セメントを材料としたものがある。特に、グラウト用に開発された超微粒子セメントおよびコロイドセメントは粒径、粘性およびブリージング率（未固結時のコンクリート中の水の上昇率。小さいほど粒子分布が均等である）が小さく、固化後の圧縮強度が強いことからグラウト材として優れているが、価格は高

くなる。基本材料の物性として、粒径を比較すると、コロイドセメントの粒径（財国土開発技術研究センター，1983）は、ベントナイト材の一種である月布産の微粒子ベントナイト（VA）の粒度分布とほぼ同様の分布を持っている。微粒子セメントはこれよりも粒子が細かく、普通ポルトランドセメントや早強セメントはこれよりも粒子が粗い。

セメント系グラウト材は上記のようにさまざまな材料のものが開発されてきているが、その品質として、埋め戻し後における緩衝材および埋め戻し材の材料であるベントナイトとの接触を考慮すると、ベントナイトに対する変質作用といった化学的な影響の少ない低アルカリ性のものが有効であると考えられる。また、ある程度の強度を確保できることから、坑道壁面周辺の弱層部等を補強する（土木学会，1979）効果も、このセメント材に期待できると考えられる

粘土系グラウト材料に求められる条件は、粒度が小さいこと、分散性・流動性がよいこと、耐久性があり低透水性であること等である。また、周辺岩盤の変形に追随する力学的緩衝性にも優れている。粘土系グラウトとして、長期耐久性、低濃度でゲルを生じうる吸収性、微細な亀裂にも注入できるような小さな粒径等の長所を有しているベントナイトおよびカオリナイトを主体とした材料がこれまで考えられてきている。ベントナイトは膨潤性があり、カオリナイトは膨潤性はないものの沈降性がよく割れ目内で安定である。

グラウトの材料は、その機能により分類されるが、一時的な湧水量の抑制には硬化するセメントモルタル系材料（主に対策工で使用）、地下水の流動経路となりえる大規模な割れ目の処置に関しては目詰まり効果を期待できる粘土系材料（主に注入工で使用）、プラグの設置時における岩盤とのすきまの充填に関してはプラグ材料に対応したもの（コンクリートプラグに関してはセメント系材料、粘土プラグに関しては粘土系材料）が考えられる。

また、セメントモルタル系材料による対策工により湧水を制御した坑道壁面に対してセメント材の奥側に粘土材のグラウトを注入して割れ目の低透水性を補強するといった、セメント材と粘土材の併用も有効であると考えられる。

これまでにセメントモルタル材を対象として粘性係数、ブリージング量と含水比および粒子径の関係から粘性係数は含水量の増加および粒径の増大にともない小さくなり、ブリージング量は含水比の増加および粒径の増大にともない大きくなることがわかっている（棚井・増田，1991）。これは、ベントナイト材に関しても同様である。また、花崗岩を対象とした原位置での試験を行うために、微粒子セメントと分散剤の混合剤、コロイドセメント+粘土+分散剤の混合剤を用いた。杉田・藤田（1996）は釜石原位置試験場にて、粘土系グラウト単体材料として微粒子ベントナイト（VA）の懸濁液を試料とした。この試験で用いたスラリー液の粘性は、図 5-2 に示すように濃度の増加にともない増加することがわかっている。

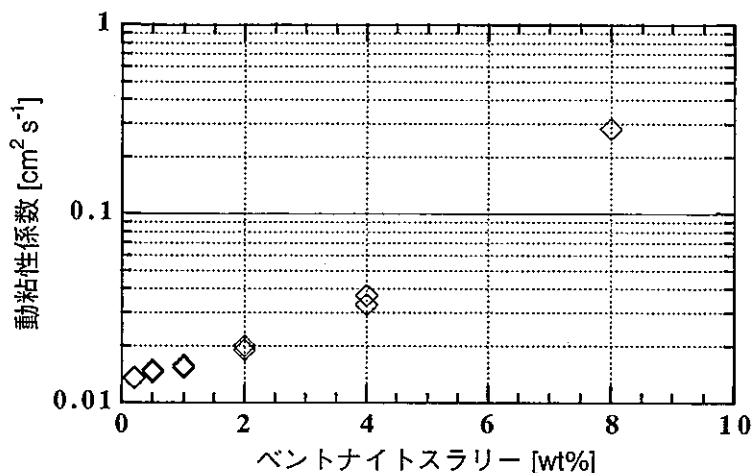


図5-2 微粒子ベントナイト (VA) のスラリー溶液の濃度と動粘性係数の関係

5.2 グラウトの施工

グラウトの注入方式として、1液1系統式(1ショット方式)、2液1系統式(1.5ショット)、2液2系統式(2ショット)がある(地盤工学会, 1999)。1ショット方式とは主剤と助剤をあらかじめ所定の配合比で混合しておき、それを注入するものである。1.5ショット方式は、注入管頭部に主剤助剤のタンクを別に設置し、注入管内で液を混合しながら注入するものである。2ショット方式とは注入箇所の手前まで主剤助剤をそれぞれの別の注入管で送り込み、そこで2液を混合し注入するものである。固化時間を調整するセメントモルタル系および水ガラス系グラウトでは1.5ショット方式や、2ショット方式が通常用いられ、粘土系グラウトでは濃度調整したものを注入することから1液1系統式が通常用いられる。

注入の方法としては、試錐孔の上方から順次注入を行うステップ注入(段階式注入, ステージ注入)、試錐孔下側からロッドを引き抜きながら順次注入を行うロッド注入(引き抜き注入)、パッカーを用いて注入区間を規制して注入するパッカー注入がある。

図5-3に示すようにグラウト注入による地盤改良の後に坑道を掘削するといった工法を実施した青函トンネル(中原ほか, 1983)では、ガラスパイプを注入用のパイプとして孔口でグラウト液を混合する1.5ショット方式でグラウトを行った。このとき、注入対象範囲は坑道径の3倍程度の坑道周囲全般であり、注入したグラウト材の固化により地盤改良された坑道を発破工法にて掘削した。棚井・増田(1991)は、パッカー注入でパッカー区間に超音波発信機を設置する手法を試みている。

注入圧の観点からは、一定の注入圧力で注入を行う静的注入工法、注入圧力を任意に変化させる動的注入工法および岩盤内の動水勾配を利用した自然浸透工法がある。

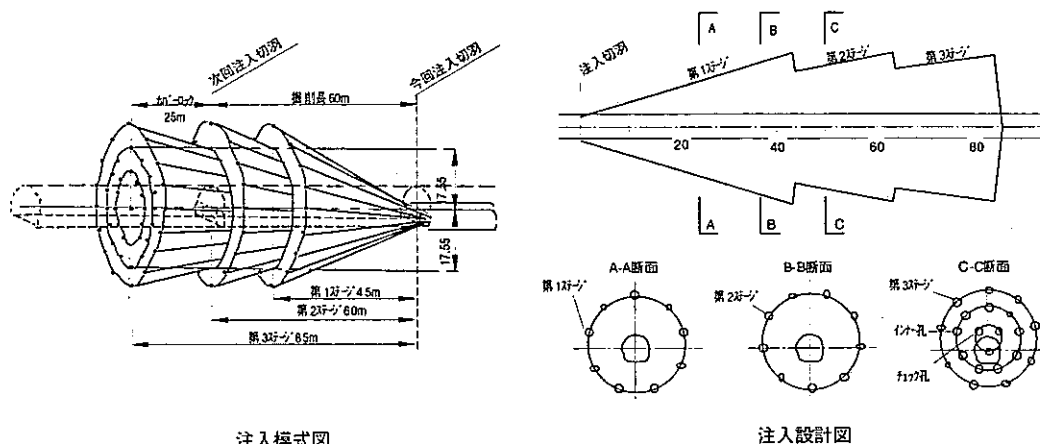


図 5-3 止水グラウト工法の施工例 (中原ほか, 1983)

グラウトの効果については、グラウトの目的が岩盤の透水性の低減化ということであるので、透水係数の変化で確認するのが一般的である (日本材料学会, 1968)。また、強度特性に関して、双木ほか (1997) は花崗岩を対象としたセメントグラウトの岩盤改良試験を実施し、試錐孔の変形係数および静弾性係数で評価することで岩盤の固密化、均質化、一体化についてその効果を示している。

5.2.1 対策工

対策工としてのグラウトは処分場建設時や操業時の作業に有意な影響を与えない程度に湧水を低減するものである。処分場の建設が地下数百 m から千 m という深度で行われることを考慮すると、周囲の岩盤が地下水位以下でかなり高い水圧の場であると考えられる。地下水位以下の岩盤内に処分場を建設する場合、坑道を掘削すると開放された坑道内と周辺岩盤内とに地下水の動水勾配が発生し、坑道に向かって地下水が浸出してくることが予想される。坑道内に有意な湧水が発生すると、ポンプによる湧水の汲上げあるいは湧水箇所の点検作業の実施といった作業効率の低下が生じる。また、湧水箇所やその規模によっては設置した緩衝材の流出といった問題が生じ、さらには坑道の水没といった事態も起こりえると考えられる。このような事態を回避するためには、処分場の建設、操業といった稼働期間中に有意な影響を与えると考えられる湧水が発生した場合には、適切に処置することが必要である。

特に、建設時の対策工としては、グラウトの注入範囲の対象となるのは、坑道掘削時の岩盤改良として坑道の掘進方向前方へのセメントモルタル系グラウトあるいは薬液 (水ガラス) 系グラウトの施工が考えられる。この場合、坑道掘進時の先行ボーリング等により坑道掘削に対して有意な影響を与えるような湧水を伴う割れ目等が岩盤内に認められた場合、止水効果の高いグラウトを適切な位置、時期に施工する必要がある。

このような処分場で遭遇すると考えられる状況は、これまでの土木分野におい

て海底トンネル（中原ほか，1983）あるいは山岳地帯を横断する深部トンネル（佐取・上橋，1981）等さまざまな施工実績がある。これらの現場作業では，いずれも地下水の湧出抑制が避けられない問題であり，数トン／分といった多量の湧水が発生するような地盤に対する止水対策としてセメントと水ガラスを混合したLW注入（不安定水ガラス工法）が有効であることがわかっている。

処分場での候補材料である低アルカリ性セメントを主体とするセメントグラウトのこのような場での施工実績はないものの，基本物性はこれらの土木分野での材料と大きくは変わらないことから，処分場における地下水の湧水に関しても，十分に適用可能と考えられる。

5.2.2 注入工

粘土系材料により割れ目を充填する場合，グラウトの注入方式として，坑道内から対象とする割れ目に岩盤内で交差するように注入孔を配置し，パッカー等で注入区間を制御して注入を行う手法が考えられる。注入は低濃度のものから濃度を上げていくのが効果的である。注入圧の設定では，一定の注入圧力で注入を行う静的注入工法，注入圧力を任意に変化させる動的注入工法があり，岩盤の状況等から適切な注入方法を選択する。

割れ目の充填として花崗岩を対象とした粘土グラウトの試験を釜石で行なった。これは，図 5-4 に示すように単一割れ目に岩盤内で交差するように試験孔（直径66mm）を削孔し，100%ベントナイト溶液を口元にパッカーを設置するシングルパッカー方式により静的注入工法で注入孔に注入した（杉田・藤田，1996；サイクル機構，1999）。

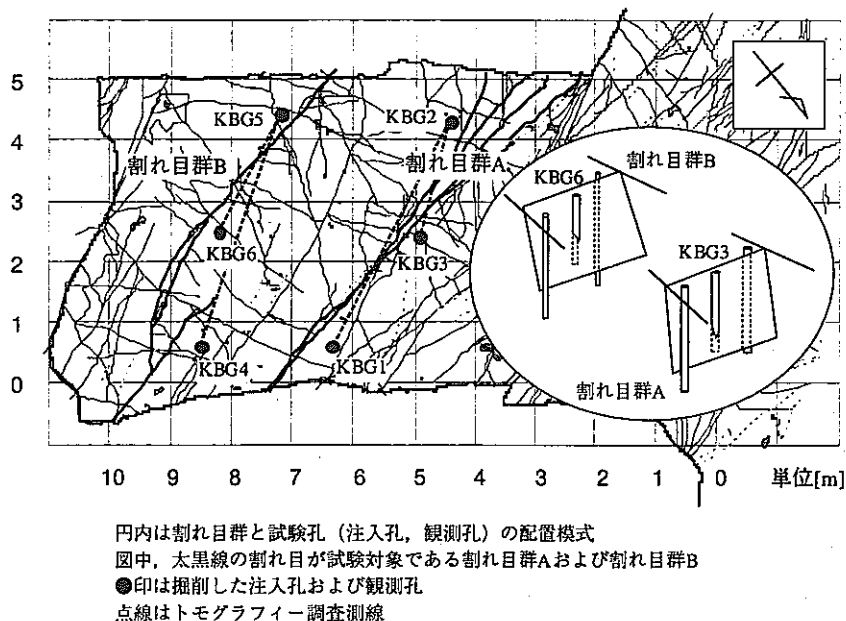


図 5-4 割れ目に対する粘土グラウト注入試験（サイクル機構，1999）

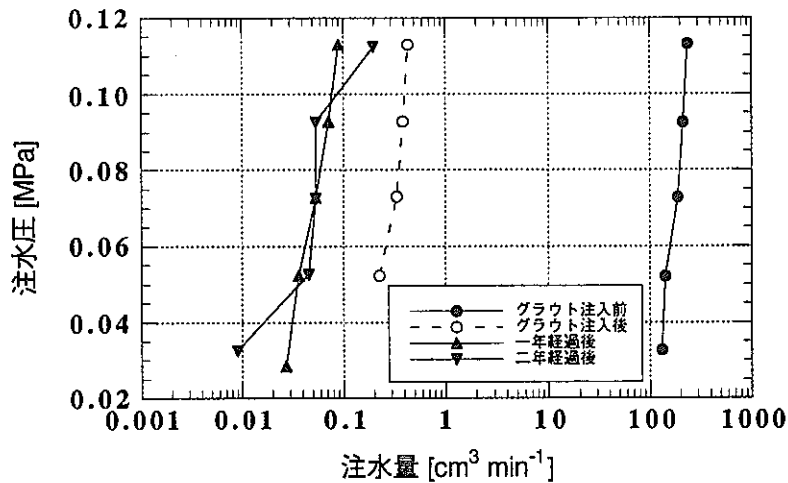


図 5-5 釜石原位置試験における透水試験結果

グラウト材であるベントナイトスラリーの濃度は、ベントナイトの重量比で 0.2wt %から 8.0wt %とし、0.2wt %から順次、注入圧力 1.0MPa の静的注入法で注入した。グラウト効果の確認としてグラウト前後、グラウト 1 年後、2 年後に透水試験を実施した。透水試験の結果は図 5-5 に示すようにグラウト注入後に透水性は低下し、その低透水性は 2 年経過後でも維持された。また、Börgesson, et al. (1991) が実施したようなグラウトの浸透状況を確認するために実施した岩盤のはぎ取りによる注入孔周囲の観察では、注入孔が交差した割れ目表面にベントナイトの付着が観察された (核燃料サイクル開発機構, 1999)。

また、前述のトンネルシーリング性能試験では、プラグ拡幅部においてグラウト注入試験(Masumoto et al., 1999; 升元ほか, 1999)を実施した。ここでは、100%ベントナイトの粘土グラウト溶液の注入が、拡幅部近傍の掘削影響領域の透水性を低下させることを示した。

注入方法に関する実績例としては、Börgesson, et al. (1991)が動的注入工法を実施している。彼らは、直径 76cm、深さ 3.5m の試験孔に、大口径の試験孔用に改良した透水試験装置を適用してパッカー区間内に水のかわりにグラウトを注入した。試験区域の透水係数は、一つが 10^{-9} m s^{-1} オーダー、もう一つが 10^{-7} m s^{-1} オーダー以下であり、グラウト後はいずれの試験区間も $10^{-10} \text{ m s}^{-1}$ オーダー以下となった。坑道周囲全体の透水性を改良する手法として久慈の石油備蓄基地において石油の漏えいを防止するための水封式工法の一環として Miyanaga and Ebara (1996) が岩盤内のグラウト供給孔と地下タンクとの動水勾配を利用した自然浸透工法を実施している。Ohasi et al. (1996) は模擬割れ目を用いた室内試験においてであるが、Börgesson et al. (1991)が実施した試験と同様の試験装置を用い、動的注入法の効率化について調査した。その結果、模擬割れ目内に最も広範囲にグラウトを浸透させるのは 10Hz の振動であることを確認している。

6. 工程

地下施設の埋め戻しにおける工程について、埋め戻し材およびプラグの施工を対象として検討した。プラグは処分坑道の両端に設置が考えられるコンクリートプラグは2個設置するとして工程に含めた。ベントナイトプラグは施工に必要な工数の算出を行い、破碎帯と坑道の遭遇頻度は処分場全体で5箇所として工程に含めた。処分場のレイアウト案は、棚井ら(1999)によって処分孔縦置き方式および坑道横置き方式についてそれぞれ硬岩系岩盤および軟岩系岩盤について検討されている。ここでは、このレイアウト案にしたがって、各工程を概算した。

6.1 進捗設定

6.1.1 坑道の埋め戻し

処分場の坑道断面は図4-6に示した形状が黒木ら(1999)によって、坑道延長は棚井ら(1999)によって検討されている。坑道形状および延長の一覧を表6-1に示す。

表 6-1 坑道形状および延長の一覧

項目	数値
坑道断面積 (図 4-6 参照)	主要・連絡坑道 硬岩 22.318m ² 軟岩 18.450 m ² 処分坑道 縦置き 主要・連絡坑道と同じ 横置き 3.87m ² (埋め戻しはないが、プラグ施工で断面積を考慮する)
坑道延長	
処分坑道 (1 パネルあたり)	硬岩 1,112.24m が 27 本 軟岩 905.78m が 50 本
主要坑道	硬岩 横置き 2,933m 縦置き 3,688m 軟岩 横置き 2,908m 縦置き 4,053m
連絡坑道	硬岩 横置き 25,209m 縦置き 31,402m 軟岩 横置き 24,402m 縦置き 35,972m
立坑 (1 本あたり)	硬岩 1,055m 軟岩 536m

ここで、工程の積算に余裕を持たせるため、坑道断面積は坑道形状の大きいことから進捗が小さくなる硬岩系岩盤の場合を代表して用いて検討した。

次に、建設省土木工事積算基準等に基づいた各作業ごとの能力を示す。たとえば、人力による埋め戻し材のまきだし能力は、これに相当する人力盛り土を適用した。本基準によると、人力盛り土の能力は 10m³あたり作業員 1.9 人である。これをまきだし能力に読み替えて、1 パーティー 5 人、実働作業時間を 7 時間/日とすると、1 時間あたりのまきだし能力は、

$$10 \div 1.9 \times 5 \div 7 = 3.8 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

となる。このほか、埋め戻しに必要となる作業の能力の一覧を表 6-2 に示す。

表 6-2 作業別能力の一覧

区分	項目	仕様	数量	単位	備考
立坑	500m	4.5m ³ ヘッセル 2 器	37.4	m ³ /h/本	3 章の検討
	1,000m	4.5m ³ ヘッセル 2 器	22.4	m ³ /h/本	3 章の検討
底積み	積み下し	0.35m ³ 級ローテイングショベル	24.1	m ³ /h/台	
	500m	2.5m ³ 級クロラタンブ	1.3	m ³ /h/台	複数台追加
	1,000m	2.5m ³ 級クロラタンブ	1.4	m ³ /h/台	複数台追加
埋め戻し	機械まきだし	3m ³ 級フルトローサー	38.4	m ³ /h/台	
	機械締固め	9t 級搭乗式振動ローラー	22.7	m ³ /h/本台	
	人力まきだし	5 人で 1 パーティー	3.8	m ³ /h/パーティー	
	人力締固め	1t 級ハンドガイド振動ローラー	9.5	m ³ /h/台	
	吹付け	8-21m ³ 級コンクリート吹付け機	5.0	m ³ /h/台	2 台使用

人力による埋め戻し能力はまきだした材料を振動ローラーで締固める作業である。表 6-2 から 1t 級のハンドガイド振動ローラーの締固め能力は 9.5m³/h/台であるから、1 パーティーの人力で埋め戻し材をまきだし、それを 1 台の振動ローラーで締固める場合、1 時間あたりのまきだし・締固め（埋め戻し）能力は

$$1 / (1/3.8 + 1/9.5) = 2.7 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dots \dots \dots (6.2)$$

である。機械埋め戻しの場合、1 台あたりの埋め戻し能力は

$$1 / (1/38.4 + 1/22.7) = 14.3 \text{ m}^3/\text{h} \quad \dots \dots \dots (6.3)$$

となる。

硬岩系岩盤における坑道の埋め戻しは、ここでは図 6-1 に示すように吹付け、機械締固め、人力締固めを併用することとし、式 (6.2) , (6.3) で設定した埋め戻し能力に基づいて、埋め戻しの工程の進捗を規定するものを検討した。それぞれの施工断面を考慮して計算した作業区分別の能力および進捗を表 6-3 に示す。

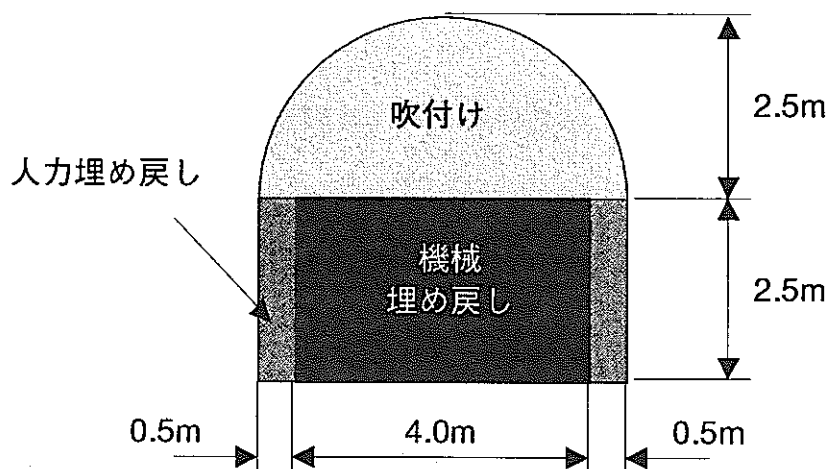


図 6-1 工程積算のための坑道の埋め戻し作業区分

表 6-3 作業区分別施工能力の一覧

区分	能力	単位	断面積 [m ²]	進捗	単位
機械埋め戻し	14.3	m ³ /h/台	10.00	1.4	m/h/台
人力埋め戻し	2.7	m ³ /h/パーティー	2.50	1.1	m/h/パーティー
吹付け	5.0	m ³ /h/台	9.82	0.5	m/h/台

表 6-3 から、坑道の埋め戻しの進捗を規定するのは、もっとも進捗が遅い吹付けである。吹付け機は作業スペースを考慮すると 2 台まで導入可能であることから、2 台導入した場合 1 時間あたりの進捗は 1.0m となる。これより、埋め戻しの施工進捗は 1 時間あたり 1.0m とした。

ここで設定した埋め戻しの進捗と立坑の運搬能力を比較し、両者の面から作業工程の進捗を検討した。坑道の埋め戻し能力は、1 箇所あたり坑道断面積と施工進捗から 22.3m³/h である。しかしながら、坑道は地下施設で多数に分岐しており、埋め戻しの作業場所を分散させることで実質的な埋め戻し能力を向上させることができる。一方、立坑 1 本あたりの搬送能力は 3 章で検討したように、深度 500m の場合、37.8m³/h、1000m の場合、22.4m³/h である。埋め戻しに使用できる立坑はレイアウト案では 2 本であるため、設定できる搬送能力はそれぞれ 2 倍となり、

75.6m³/h, 44.8m³/h である。これは、埋め戻しの作業場所を 4 箇所あるいは 3 箇所にする事で搬送能力以上の埋め戻し能力を確保できることを示している。

そこで、立坑の搬送能力により坑道の埋め戻しの進捗が規定されるものとして、稼働時間を 16 時間の場合のそれぞれの深度での作業進捗を式 (6.4) で算出した。

$$\text{進捗} = \text{立坑の搬送能力} \div \text{坑道断面積} \times \text{稼働時間} \quad \dots \dots \quad (6.4)$$

以上の結果から設定した坑道埋め戻しの進捗は、深度 500m の軟岩系岩盤の場合、64.0m/日、深度 1,000m の硬岩系岩盤の場合 32.0m/日である。

次に、立坑の埋め戻しの進捗を算出する。表 6-3 より人力の埋め戻し能力は 2.7m³/h であり、立坑の直径が 6.5m であることから、立坑の埋め戻しの進捗は、実働時間を 7 時間とした場合、0.57m/日となる。

6.1.2 プラグ施工

プラグ施工に関わる作業項目の一覧を表 6-4 に示す。ここで、坑道内における作業効率の低下を考慮して施工能力は前述の基準の 50% で、実働時間は 14 時間として計算した。

表 6-4 作業別能力の一覧

区分	項目	仕様	数量	単位	備考
切 広 げ	軟岩掘削	油圧式ブレーカー	119	m ³ /日/台	
	硬岩掘削	油圧式ブレーカー	91	m ³ /日/台	
	コンクリートはつり	油圧式ブレーカー	91	m ³ /日/台	
	ずり積込	0.35m ³ 級ローディングショベル	168.7	m ³ /日/台	表 6-2 参照
	ずり搬送	4.5m ³ ハッセル 2 器(500m)	529.2	m ³ /日/台	表 6-2 参照
	ずり搬送	4.5m ³ ハッセル 2 器(1,000m)	313.6	m ³ /日/台	表 6-2 参照
	準 備 工	土留め設置		10	m ² /h/ハ-ター
型枠組立			10	m ² /h/ハ-ター	コンクリートプラグ
型枠撤去			14.8	m ² /h/ハ-ター	コンクリートプラグ
鉄筋組立			3.3	t/日/ハ-ター	コンクリートプラグ
プ ラ グ 施 工	コンクリート打設		83.3	m ³ /日/ハ-ター	
	養生		3	日	
	グラウト注入	セメント材料	14.8	m ³ /日/ハ-ター	
	ベントナイトブロック	1.8t/ブロック(m ³)	14	m ³ /日/ハ-ター	1ブロック/h
	グラウト注入	ベントナイト材料	33.3	m ³ /日/ハ-ター	
	隙間処理	ベントナイト材料	4	日	ベントナイトプラグ

次に、坑道の両端に設置されるプラグの設置に関する進捗について検討した。プラグの形状や大きさは処分場の地質環境や岩盤の状況によって変化することから、ここでは表 6-5 に示すような仮定を設定した。

表 6-5 プラグの仮定一覧

項目	区分	数量
プラグ長さ	立坑 コンクリート	10m
	坑道 コンクリート	2m
	ベントナイト	3m
切り欠き深さ	立坑 コンクリート	10m
	坑道 コンクリート	0.5m
	ベントナイト	2.5m

処分坑道におけるプラグ（坑道両端部のコンクリートプラグ）の設置は、処分坑道への廃棄体の定置と時期的に平行して進めることが出来ることから工程に大きく影響しない。このため、プラグ 1 個設置あたりの工程は、主要・連絡坑道におけるコンクリートプラグ、ベントナイトプラグの設置および立坑におけるコンクリートプラグの設置について検討した。表 6-5 から設定されるプラグ形状を対象とし、表 6-4 で求められた施工進捗を考慮して算出したプラグ 1 個の工程期間をそれぞれ表 6-6～6-8 に示す。切欠き部については進捗の小さい硬岩掘削を適用した。

表 6-6 主要・連絡坑道のコンクリートプラグの工程一覧

区分	項目	能力	数量	単位	パーティー	日数
切広	岩盤掘削	91	13.64	m ³	1	1
	ずり積込	168.7	13.64	m ³	1	1
準備工	土留め設置	10	10.5	m ²	1	2
	型枠組立	10	22.3	m ²	1	3
	型枠撤去	14.8	22.3	m ²	1	2
	鉄筋組立	3.3	2.9	t	1	1
プラグ 施工	コンクリート打設	83.3	58.28	m ³	1	2
	養生		3	日	1	3
	ゲラト注入	14.8	116.42	m ³	1	8
工程日数合計（日）						23
（ヶ月）						1.00

表 6-7 主要・連絡坑道のベントナイトプラグの工程一覧

区分	項目	能力	数量	単位	パーティー	日数
切広	岩盤掘削	91	200.86	m ³	1	3
	ずり積込	168.7	200.86	m ³	1	2
プラグ 施工	ベントナイトブロック	14	267.81	m ³	1	20
	隙間処理		4	日	1	4
	グレート注入	33.3	116.42	m ³	1	8
工程日数合計 (日)						37
(ヶ月)						1.61

表 6-8 立坑のコンクリートプラグの工程一覧

区分	項目	能力	数量	単位	パーティー	日数
切広	岩盤掘削	91	235.62	m ³	1	3
	ずり積込	168.7	235.62	m ³	1	2
準備工	土留め設置	10	33.18	m ²	1	4
	鉄筋組立	3.3	28.7	t	1	9
プラグ 施工	コンクリート打設	83.3	567.50	m ³	1	7
	養生		3	日	1	3
	グレート注入	14.8	305.37	m ³	1	21
工程日数合計 (日)						49
(ヶ月)						2.13

6.2 埋め戻しの工程

6.1 節で検討された結果に基づき、処分坑道、主要坑道、連絡坑道、立坑の埋め戻し期間を概算した結果を表 6-9 に示す。1 ヶ月は 23 日として計算した。ここで、処分坑道は坑道 1 本あたりの埋め戻し期間を概算した。処分坑道に設置するコンクリートプラグは坑道の両端部に設置されるため、1 坑道あたり 2 個とした。

主要坑道に関しては、処分パネル 1 パネル分について埋め戻し期間を概算した。主要坑道は 2 パーティーが平行して作業することとした。主要坑道の端部にはコンクリートプラグが設置されるが、レイアウト案によって個数が変更になるため、ここでは合計期間としては考慮していない。

連絡坑道はレイアウト案から示される総延長に対して平行して作業が行える部分についてはパーティー数を増やして作業するように設定して概算した。最大のパーティー数は 4 である。処分パネルは破碎帯から離すことから、処分パネルを連結する連絡坑道は破碎帯と交差することが考えられる。ここでは、5 箇所交差すると仮定した場合のプラグ施工期間を工程として考慮した。

立坑に関しては、坑道坑口にコンクリートプラグを設置することとし、それ以

外を埋め戻すこととして概算した。

表 6-9 埋め戻し期間の一覧

項目	区分	進捗 m/日	延長 m	期間 ヶ月	プラグ設置 ヶ月	合計期間 ヶ月
処分坑道 1本	硬岩	32	1,133.68	1.54	2.00	3.6
	軟岩	64	938.92	0.64		2.7
主要坑道 1パネル	硬岩横	32	2,933	3.99		2.0
	硬岩縦	32	3,684	5.01		2.6
	軟岩横	64	2,908	1.98		1.0
	軟岩縦	64	4,053	2.75		1.4
連絡坑道	硬岩横	32	25,209	作業位置によりハーター 数が変わる。 プラグ設置は5箇所。		32.1
	硬岩縦	32	31,402			34.9
	軟岩横	64	24,402			24.4
	軟岩縦	64	35,972			27.3
立坑	硬岩	0.57	1,045	79.71	2.13	81.9
	軟岩		525	40.05		42.2

主要坑道は2ハーターで作業。

連絡坑道は最大4ハーターで作業するとし、プラグ設置期間を含めた期間を合計に記す。

7. 品質管理項目

7.1 骨材混合体

骨材混合体に求められる低透水性等の諸特性を左右するのはベントナイトの混合率、密度等である。骨材混合体はベントナイトと骨材の混合物であり、ケイ砂混合体である緩衝材とはほぼ同じ性質のものと見なすことができ、ケイ砂混合体（千々松ほか、1999）の品質管理項目を骨材混合体に準用することができる。

(1) 材料

材料の品質管理項目の一例を表 7-1 に示す。

1) ベントナイト

ベントナイトはメチレンブルー収着量によりモンモリロナイトの含有量を管理する。不純物の混入を避けるために鉱物組成および化学組成を管理する。また、締固め特性に影響する粒度分布および含水比を確認する。

2) 骨材

材料のまきだしやブロックの製作を均一なものとするためには、骨材の物性（鉱物組成および化学組成）、粒度分布が管理されている必要がある。また、ベントナイトとの混合時のために含水比を管理する。

表 7-1 骨材混合体の品質管理項目一覧

対象	品質特性	試験・測定方法	適用
材料	1.ベントナイト		
	製造ロット		
	メチレンブルー収着量	JBAS-107	
	化学組成	試験成績書	
	鉱物組成	試験成績書	
	粒度分布	JGS T 131	
	自然含水比	JGS T 121	
	2.骨材（砂，礫）		
	化学組成	試験成績書	
	鉱物組成	試験成績書	
	粒度分布	JGS T 131	
	自然含水比	JGS T 121	
3.配合後			
材料ロット			
配合時含水比	JGS T 121		
混合率	JGS T 131		

JGS 地盤工学会基準，JBAS ベントナイト工業会標準試験方法

3) 混合率

ベントナイトの混合率は、材料の設計要件（低透水性であること等）を満たすために重要な品質管理項目となる。設計で設定された混合率であることを確認す

る。

(2) 締固め施工

まきだされた材料を締固める締固め、あるいは横締固めの工法は一般的な道路建設工事と類似しており、一般に適用されている道路土工要綱（日本道路協会、1990）の品質管理項目を一部適用することができる。この工法では、調整された材料を用い、規定のまきだし厚さ、締固めエネルギー等で行われることを管理する。適宜サンプリングを行い、その確認を行う。品質管理項目の一例を表 7-2 に示す。

1) まきだし厚さ

まきだし厚さについては、適切な厚さを設定することで付与する締固めエネルギーを一定とすれば、均質な締固めが可能となる。そのため、設計で設定されたまきだし厚さで施工されることを確認する。

2) 締固めエネルギー（転圧回数、重量）

締固めエネルギーは、まきだされた埋め戻し材を適切な施工密度とするように与えるものであり、使用する機械は設計で設定された能力を満足するものとする必要がある。

3) 出来形

埋め戻し材の充填密度は、規定の容積に規定量の材料を充填することで確認できる。これは、坑道断面の形状が把握されていれば出来形によって管理することができる。ここでは、各締固め工程における出来形を確認する。

表 7-2 締固めに関わる品質管理項目一覧

対象	品質特性	試験・測定方法	適用
施工	まきだし厚さ	まきだし厚さ試験	50m毎
	転圧回数	工事写真	50m毎
	出来形	出来形検査（測量）	500m ³ に一回

(3) 高圧縮骨材混合体ブロック

ブロックの場合、製作段階で材料の投入量等を管理し、設置時においてはブロックのすきま等を確認することとなる。ブロックの管理項目の一例を表 7-3 に示す。

1) ブロック製作時

投入量；ブロックは型枠を用いて製作するため、作成する容積に対して仕上がりの寸法を考慮し、規定の投入量となるよう管理する。

成形圧力；ブロックの成形は、圧縮成型機により行うこととなり、機械の最大荷載能力を越えないようにすることが必要である。

2) 設置時

設置位置；製作したブロックは、設計された位置に設置する必要がある。これ

は、設置位置の誤差によりすきまが生じることを抑制するためである。

すきま；ブロックの設置では、設置機械の操作性等を考慮し、ブロック間にある程度のすきまを必要とする。しかしながら、すきまのずれ等はブロックの設置位置に影響するため、管理する。

表 7-3 ブロックに関わる品質管理項目一覧

対象	品質特性	試験・測定方法	適用
製作	成型		全ブロック 全ブロック 全ブロック 全ブロック
	圧力, 加圧速度		
	成型装置精度		
	投入量		
	寸法		
施工	すきま	すきま検査	すきま毎

7.2 コンクリート材

低アルカリ性コンクリートあるいは普通コンクリートを材料とする品質管理は、材料（セメント、水、骨材、混和材料、混合率、スランプ等）の管理、打設速度等が挙げられる。

コンクリートの配合設計に関する一般的な考え方は、構造物に必要な強度、耐久性、水密性を兼ね備え、均一でかつ、作業に適するワーカビリティ（作業性のよさ）をもったコンクリートが、最も経済的に得られるように、セメント、水、骨材および混和材料の割合を選定することである（日本材料学会、1987）。コンクリートの配合設計の進め方の例を図 7-1 に示す。構造物に求める強度、許容するスランプ、骨材の寸法が設定されると、単位水量 W が設定され、それにあった最小水セメント比 W/C が求まり、単位セメント量 C が決定される。コンクリートの品質管理は、土木や建築の分野ごとに確立されており（たとえば、土木学会、1996b）、これらの品質管理手法を適用することが可能である。管理項目の一例を表 7-4 に示す。

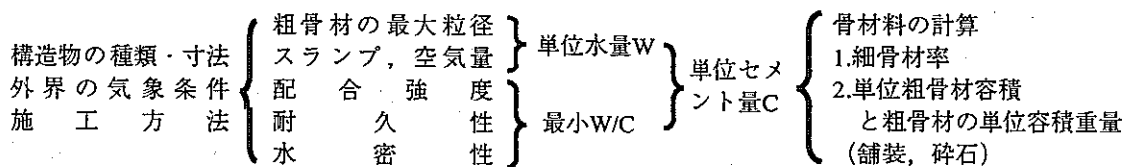


図 7-1 配合設計を進める手順（日本材料学会、1987）

1) コンクリート製造時

材料、配合；コンクリートはその材料となるセメントの選定、混和材、粗骨材等により強度が決まる。そのため、設計基準強度を確保できるような材料と配合を選定する。

2) 打設時

スランプ；坑道の形状，コンクリートの打設方法を考慮して，適切なスランプとなるように設定する。

空気量；コンクリートに混在する空気は，作業性の改善に有効であることから適切な空気量となるようにする。また，過剰な空気量は不必要な空隙をプラグ内に発生させることから，強度の低下等が考えられるため，管理が必要である。

硬化後の出来形；コンクリートは，打設後に硬化収縮するに従い，上部に隙間が生じる可能性がある。この隙間を適切に判断することにより，膨張性コンクリート等で充填する。

3) 固化後

一軸圧縮強度；固化後の材料が適切な強度を確保できているかは重要である。打設したコンクリートで別途モールド等により供試体を作成し，一軸圧縮強度を確認する。

表 7-4 コンクリート材に関わる品質管理項目一覧

対象	品質特性	試験・測定方法	適用
材料	1.セメント 成分 各種物理試験 2.骨材 産地，岩種 粒度分布 3.鉄筋 成分 強度	JIS規格に準拠	
施工	スランプ 空気量 一軸圧縮強度 出来形	JIS A 1101 JIS A 1116, A 1118 JIS A 1108 出来形検査	150m ³ に一回 150m ³ に一回

7.3 グラウト

グラウトの品質管理項目としては，選択した材料，注入方法の管理がある。注入方法では，注入手法によりグラウトの浸透範囲は異なり，対象とする注入範囲にグラウト材を効率良く浸透させるためにも選択した注入手法を維持することが必要である。また，グラウトの注入圧は高圧であればそれだけ注入効率を上げられる一方，カバーロックの破損，岩盤内割れ目の開口，といった現象も起こると考えられる。

グラウトの注入圧には場に応じた最適注入圧（日本材料学会，1968）があり，可能な限りこの圧力に近い状態で注入することが望ましい。これより，岩盤の状況から判断される適切な注入圧を選定することが必要である。混合材の粘性は注

入段階においてグラウトの浸透性の効率化等に影響を与えることから、適切な温度を設定・管理する必要がある。

8. まとめ

高レベル廃棄物の地層処分における地下施設の埋め戻しについて検討した。埋め戻し材は地下施設の建設時に大量に発生すると考えられるずりにベントナイトを混合した骨材混合体を基本とした。

ここでは、埋め戻し材の物性として、ずりを模擬した礫とベントナイトの混合材を用いて透水特性、締固め特性、膨潤特性、強度特性を明らかにした。特性は骨材の混合率や乾燥密度が異なる試験結果を有効粘土密度という同じ指標で整理して評価した。この結果、骨材混合体ではベントナイトを 15 wt%程度混合することで $10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ オーダーの低透水性を確保することができ、その時の有効粘土密度は 0.9 Mg m^{-3} であった。締固め特性に関しては、ベントナイトを 15 wt%程度混合すれば、乾燥密度が最大となり、上記の有効粘土乾燥密度 0.9 Mg m^{-3} を確保できることがわかった。膨潤応力は緩衝材であるケイ砂混合体の有効粘土密度に対する関係とはほぼ同様の分布を示した。強度特性としては一軸圧縮強度と弾性係数に関して有効粘土密度との相関を明らかにした。

埋め戻しの設計として、はらみだし量を検討するとともに、緩衝材および埋め戻し材を密封するコンクリートプラグの設計についても押し抜きせん断にて検討を行った。その結果、適切な材料を埋め戻し材として充填することで人工バリアを形成する緩衝材の健全性を維持できること、コンクリートプラグが緩衝材および埋め戻し材の膨潤応力に耐えうることを示した。

さらに、埋め戻し時に想定される対策として、粘土プラグおよびグラウトに関しても検討を行った。また、これら一連の項目に対してそれぞれ施工方法を検討し一覧として示した。

最後に埋め戻し材やプラグ材、グラウト材の形態に対応して骨材混合体およびセメント材料の品質管理項目について示した。

本報告で検討された処分場の埋め戻し技術に関しては、今後、別途計画が進められている深地層の研究施設や諸外国の地下研究施設での試験を通じて、詳細な工学的検討を行うこととなる。

謝 辞

本研究の実施にあたり、グラウト技術の適用性、実績調査に関して鹿島建設株式会社技術研究所の戸井田克氏に助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

Börgesson, L. Pusch, R., Fredrikson, A., Hökmark, H., Karnland, O and Sandén, T. (1991) : Final Report of the Rock Sealing Project -Sealing of the Near-Field Rock Around Deposition Holes by Use of Bentonite Grouts, STRIPA PROJECT TR91-34.

Börgesson, L., Johannesson, L. and Sandén, T. (1996) : Backfilling materials based on crushed rock - geotechnical properties determined in laboratory, SKB progress report HRL-96-15.

Börgesson, L. (1998) : Test Plan for Backfill and Plug Test, SKB Progress Report HRL-98-08.

Blümling, P. (1997) : Borehole sealing project at the Grimsel test site, 3rd European Engineering Geology Conference 33rd Annual Conference of the Engineered Group of the Geological Society, pp.19-35.

千々松正和, 杉田裕, 雨宮清 (1999) : 緩衝材の製作・施工技術に関する検討, JNC TN8400 99-035.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-, PNC TN1410 92-081.

動力炉・核燃料開発事業団 (1996) : 地層処分研究開発の現状-平成8年度-, PNC TN1410 96-071.

土木学会 (1979) : 土木技術者のための岩盤力学-昭和54年版-.

土木学会 (1996a) : 平成8年度制定コンクリート標準示方書-設計編-.

土木学会 (1996b) : 平成8年度制定コンクリート標準示方書-施工編-.

土木学会 (1997) : 圧縮空気貯蔵発電システムと土木技術.

土質工学会 (1982) : 土質工学ハンドブック.

Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M. and Stillborg, B. (1993) : OECD/NEA international stripa project overview volume 1 executive summary, pp. 67-70.

藤田朝雄, 杉田裕 (1998) : JNC/AECL 共同研究-トンネルシーリング性能試験の現況について-, サイクル機構技報, JNC TN1340 98-001, pp. 79-84.

古市光昭, 奥津一夫, 田中俊行, 棚井憲治 (1998a) : 高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻し (シーリング) 概念に関する検討, 土木学会論文集, No. 594/VII-7. pp. 21-33.

古市光昭, 奥津一夫, 平和男, 原啓二 (1998b) : 高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討, 原子力バックエンド研究, vol. 5, No. 1, pp. 51-58.

古市光昭, 奥津一夫, 田中益弘 (1999) : 高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討 (その2), 原子力バックエンド研究, vol. 5, No. 2. pp. 51-57.

Gray, M., Cheung, S. and Dixon, D. (1985) : Swelling pressures of compacted bentonite/sand mixtures, Materials Research Society Symp. Proceedings, Vol. 44, pp. 523-530.

Gray, M. and Shenton, B. (1998) : For better concrete, take out some of the cement, 6th ACI/CANMET Symposium on the Durability of Concrete.

Gunnarsson, D. Johannesson, L-E., Sandén, T. and Börgesson, L. (1996) : Field test of tunnel back filling, SKB progress report HRL-96-28.

地盤工学会 (1996) : 土質試験の方法と解説.

地盤工学会 (1999) : 地盤工学ハンドブック.

核燃料サイクル開発機構 (1999) : 釜石原位置試験研究総括報告書, JNC TN7410 99-001.

金属鉱業事業団 (1984) : 坑道閉そくの手引き.

Kjartanson, B., Chandler, N., Wan, A., Radhakrishna, H. and Lau, K. (1993) : In Situ Assessment of Bentonite/Sand Buffer Material, Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering, pp. 747-755.

(財)国土開発技術研究センター (1983) : グラウチング技術指針・同解説.

Komine, H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T. and Nishio, S (1991) : Permeability and

mechanical properties of bentonite-sand mixture for sealing LLW repositories, Transactions of the 11th international conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, vol. SD1, pp.271-276.

黒木繁盛, 谷口航, 小尾繁, 長谷川宏, 杉野弘幸, 窪田茂, 出羽克之 (1999) : 地下空洞の力学安定性評価, JNC TN8400 99-037.

前田宗弘, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘 (1998) ; カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性-膨潤圧, 透水係数, 一軸圧縮強度及び弾性係数-, PNC TN8410 98-021.

蒔田敏昭, 小島康司, 船戸明雄, 山富二郎 (1991) : 地下石油貯蔵における耐圧プラグの挙動, 資源・素材学会誌, vol. 107, No. 4, pp. 187-193.

Masumoto, K. Sugita, Y., Fujita, T. and Chandler, N. (1999) : Trial of Bentonite Grouting into the EDZ at AECL's Underground Research Laboratory, 29th Rock Mechanics Symposium, pp. 36-42.

升元一彦, 藤田朝雄, 杉田裕 (1999) : 埋め戻し技術におけるプラグ周辺部への粘土グラウトの適用試験, 日本応用地質学会研究発表会.

双木英人, 西林道彦, 菊池宏吉, 水戸義忠 (1997) ; グラウチングによる花崗岩岩盤の力学的改良効果に関する現場実験研究, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 343-347.

Miyanaga, Y. and Ebara, M. (1993) : A non pressurized grouting method using clay for controlling groundwater around crude oil storage caverns, Grouting in rock and concrete, pp. 177-184.

中原昭夫, 先山友康, 渡辺健治 (1983) ; 青函トンネルの施工 (16) ガラスパイプを用いた岩盤注入, トンネルと地下, 第 14 巻, 9 号, pp. 27-35.

日本道路協会 (1990) ; 道路土工要綱.

日本材料学会 (1968) : 薬液注入工法-指針と解説-.

日本材料学会 (1987) ; 建設材料実験.

Ohashi, A., Nishihama, J., Taira, O., Sawa, Y., Terado, Y. and Liu, W. (1996) : Study on dynamic injection into small fractures, Tokyo '96 second international conference on ground improvement geosystems.

佐取勘四郎, 上橋孝志 (1981) : 立坑工事における止水グラウトの施工.

杉田裕, 藤田朝雄, 菅野毅 (1995) : 吹付工法を用いた緩衝材の固着性能試験, PNC TN8410 95-179.

杉田裕, 藤田朝雄 (1996) : 原位置試験におけるグラウト試験, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 275-280.

鈴木英明, 藤田朝雄 (1999) : 緩衝材の膨潤特性, JNC TN8400 99-038.

棚井憲治, 増田純男 (1991) : 高レベル放射性廃棄物処分場のシーリング, PNC TN1410 91-050.

棚井憲治, 岩佐健吾, 長谷川宏, 郷家光男, 堀田政國, 納多勝 (1999) : 地層処分場のレイアウトに関する検討, JNC TN8400 99-044.