

高レベル放射性廃棄物地層処分場のシーリング

1991年7月



動力炉・核燃料開発事業団

環境技術開発推進本部

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。注)

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technical
Evaluation and Patent Office Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan 注)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1991

高レベル放射性廃棄物地層処分場のシーリング

実施責任者：増田 純男

報 告 者：棚井 憲治

要 旨

地層処分場の建設という行為は、地下への連絡経路が不可避であり、その結果空洞という地上と直結した経路が廃棄物定置後残されることになる。これらの開削された空洞はもとより、掘削に伴う影響領域（緩み領域、二次的亀裂の生成等）、及び地層が本来有する亀裂等に対しては、地下水を媒体とする核種の移行プロセスに有意な影響を与えないよう適切な措置を施す必要がある。

そこで、空洞や亀裂等を適切に閉塞、充填する技術の開発と材料の選定、設計その性能の評価を行うことが、地層処分研究開発の課題の一つとなる。

この課題に対し、埋め戻し、プラグ、グラウト（以下、総称してシーリングという）に係わる研究開発として、動燃事業団では昭和55年度より材料特性試験、野外試験、解析的検討等を実施するとともに、国際共同研究を通じて知見の蓄積を図ってきた。

本報告書は、今までの研究開発成果を基にシーリングに要求される機能の整理、シーリング材料の材料特性、設計、基本仕様、施工に関する現状の知見を取りまとめるとともに、シーリングの技術的見通しを示したものである。

目 次

1. はじめに	1
2. シーリングに要求される機能	3
2.1 シーリング概念	5
2.2 要求機能	5
3. 埋め戻し	9
3.1 材料	11
3.2 基本仕様	23
3.3 施工	27
3.4 機能評価	32
4. プラグ	41
4.1 材料	43
4.2 基本仕様	48
4.3 施工	53
4.4 機能評価	60
5. グラウト	69
5.1 材料	71
5.2 基本仕様	88
5.3 施工	89
5.4 機能評価	90
6. 結論	99
7. 謝辞	100
8. 参考文献	101

1. はじめに

地層処分の目標は、処分された高レベル放射性廃棄物が、いかなる時点においても人間に影響を与えないようにすることであり、この目標は、高レベル放射性廃棄物と深部の地層が本来的に備える特性を生かした安全確保の仕組みをシステムとして構築することにより達成できるとの見通しのもとに研究開発を進めている。

地層処分システムは、人工バリアと天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムを地下深部に系統立てて具現化したものである。

現時点で想定している人工バリアは、高レベル廃液をガラス固化した廃棄体（ガラス固化体）とそれを格納する容器（オーバーパック）、それらを地下深部に設置したのちの周辺岩盤との空隙充填材（緩衝材）、地下深部の処分区画と地表から地下深部へのアクセス経路の埋め戻し・閉鎖材料及び閉鎖システムから構成される。

特に埋め戻し、プラグ、グラウト（以下、シーリングと総称）は、立坑、坑道等の建設行為により、地層が本来有する特性の変化や空洞という地上と直結した大規模な経路の発生等を抑制し、地質環境が本来有する天然バリアの効果を最大化することを目的とするものである。

シーリング技術の研究開発は、候補材料の特性試験、長期健全性の確認、設計、施工等の面から諸外国で研究が進められている。

事業団においても、昭和55年度より研究開発を開始し、シーリングの候補材料として考えられている粘土系材料（ベントナイト）、セメント系材料、アスファルト系材料等の単一及び複合系に係わる材料特性試験を初めとした基礎試験を実施してきている。

本報告書は、諸外国の研究成果を参照するとともに、事業団が実施してきた成果をとりまとめ、シーリングの技術的可能性について言及するものである。

2. シーリングに要求される機能

2. シーリングに要求される機能

2.1 シーリング概念

シーリングはその目的によって埋め戻し、プラグ、グラウトに分類される。
以下にこれらの概念を示す。

(1) 埋め戻し

埋め戻しは、処分場の建設、廃棄物の定置に使用された処分坑道や立坑等を適切な材料により、適切に施工することによって閉塞し、岩盤中に人工的に設けられた空洞部を可能な限り元の状態に戻し、空洞部が地下の水理機構に与える影響をなくすことを目的とするものである。処分形態には坑道横置き方式と処分孔縦置き方式が考えられている。このうち坑道横置き方式の場合、処分坑道の埋め戻しは、高レベル放射性廃棄物に対する緩衝材の適用という、処分性能にさらに重要な因子を合わせ持つものとなる。

(2) プラグ

プラグは、岩盤中に人工的に設けられた立坑等の空洞部を移行経路とする核種移行を妨げ、埋め戻しだけでは期待できない母岩の緩み領域の地下水流入の水利バリアとしての役割を果たすこと、また、母岩と埋め戻しの境界部の接着不良に対する水利バリア及び地圧、上載荷重の応力再配分等を目的とするものである。

さらに、ボーリング調査によって掘削されたボーリング孔の閉塞にも用いられる。

(3) グラウト

グラウトは、処分場の建設に伴う岩盤の緩みの修復、地下水移行経路となりうる亀裂ならびにプラグと母岩との接触域を対象に、地層が本来有する低透水性と同等以上に改良し、プラグと組み合わせてシステムとしての水利バリアの形成を目的とする。

これらのシーリングの概念を図2.1-1に示す。

2.2 要求機能

以上述べた目的を満足するために、それぞれに要求される機能が設定される。この要求機能は、シーリングの施される環境条件や施工方法等によって左右されることから、設置された条件でシーリング材料に要求されるものである。

(1) 埋め戻し

埋め戻しに要求される機能としては、長期にわたる地下水を媒体とした核種の移行に有意な影響を与えないようにすることと、周辺岩盤の長期的変形に物理的に追従できる材料であること。

(2) プラグ

プラグに要求される機能としては、埋め戻しの場合と同様の機能に加えて岩盤の支持効果や埋め戻し材料のはらみだしを防止するという機能が要求されることから、力

学的強度が必要となる。

(3) グラウト

グラウトに要求される機能としては、地下水を媒体とする核種移行に対して、空洞開削に伴う周辺岩盤の緩みに伴う影響を最小限とすること、及び天然の地層に存在する亀裂を閉塞することにより、その影響の可能性をより低減することである。

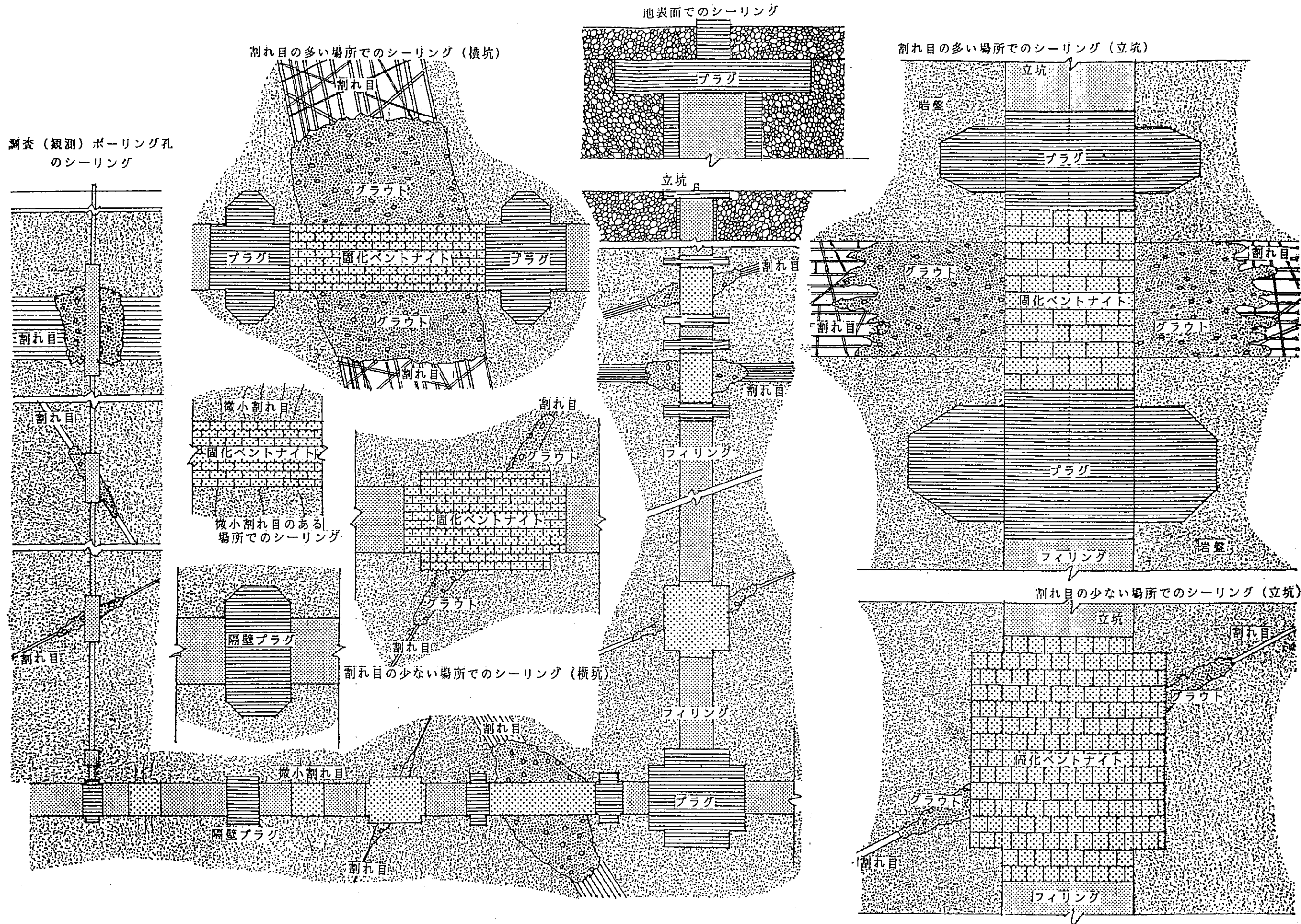


図2.1-1 我が国のシーリング概念例

3. 埋め戻し

3. 埋め戻し

2章で述べた機能を満足する可能性のある材料として、変形に追従できる可塑性があり、止水性に優れた材料として粘土系材料、及び処分地を元の状態にできる限り戻すという基本的要求から現地発生材の再利用が考えられている。

3.1 材料

ここでは、粘土系材料及び現地発生材料について言及するとともに、粘土系材料の中で有力視されているベントナイトについての材料特性について以下に述べる。

3.1.1 候補材料

(1) 粘土系材料

一般に粘土とは微細な粒子の集合体であり、粘着性を有し、主として珪素、アルミニウム、鉄、マグネシウム、アルカリ金属、アルカリ土類金属、水分より成る化学成分を有する天然物であると定義され、表3.1-1に粒子の大きさによる土の分類を示す。また、表3.1-2に粘土の種類と鉱床の型との関係を示す。

表3.1-1 粒子の大きさによる土の分類

d (粒子の直径)	1,000	100	10	1	0.1	0.02	0.002	0.001
Atterberg	卵石・転石 Steine u. Geröll	れき Kies	粗砂 Grobsand	細砂 Feinsand	シルト Schluff	粘土・ロウ石 Tonen od. kolloidale Teilchen	粘土 Ton	ロウ石 Tonstein
DIN (ドイツ工業規格)	卵石およびれき Steine u. Kies	れき Kies	粗砂 Sand	細砂 Feinsand	シルト Schluff	粘土 Ton	粘土 Ton	ロウ石 Tonstein
ASTM	Gravel		sand	silt	clay	colloid		
JIS	れき	粗砂	細砂	シルト	粘土	ロウ石		
注	肉眼でみえる		顕微鏡的		顕微鏡外			
log d(mm)	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4

表3.1-2 粘土の種類と鉱床型

粘土の種類	天然作用に因るもの (熱水成粘土セロの他)			地質作用に因るもの (堆積成粘土)		風化作用に因るもの (風化残積成粘土)		交代作用に因るもの	
	高	中	低	酸性	換水成のもの	熱帯風化	その他	広域	局部的
高アルカリ質原料	○	○			○	○			○
粘土質原料(一般)					○	○			○
セロの他			○						○
海					○				

我が国で産する粘土質原料で資源的に重要なものは鉱業統計上、次のように分類されている。

- ①カオリン鉱物を主成分とするもの；耐火粘土、カオリン質ロウ石、カオリン
- ②パイロフィライトを主成分とするもの；ロウ石
- ③雲母鉱物を主成分とするもの；陶石、セリサイト質粘土
- ④モンモリロナイト鉱物を主成分とするもの；酸性白土、ベントナイト

粘土鉱物は粒子の大きさが細かく、比表面積が大きいいため、高度に表面活性力があり、前述した一般的な粘土鉱物で見ても、比表面積は次の順番で増加す

る。

- ①カオリナイト 20(m²/g)
- ②イライト 80(m²/g)
- ③モンモリロナイト 800(m²/g)

これからもわかるようにモンモリロナイトは最も大きい比表面積を持ち、最も表面活性力のある粘土鉱物の一つである。

また、モンモリロナイトは、吸水することによって5倍から10倍の体積に膨張する膨潤性、水に分散されてコロイド状となる懸濁性、著しい粘性、容易にゾルからゲル、ゲルからゾルに転化するチクソトロピー性、強力な塩基置換性等、普通の粘土には見られない独特な性質を有している。このモンモリロナイトを多量に含むベントナイトが、シーリングに使用する材料として、特に埋め戻し材料としての利用が世界的に考えられている。

さらに、ベントナイトの長期健全性については、熱による鉱物の変質(バイライト化、イライト化)が最も重要な課題となる。それは、変質により粘土の透水性の増大、膨潤性の減少などの影響が懸念されるためである。

ストリパ計画での試験¹⁵⁾では、

- ①バイライト化作用は、約150℃以上の温度が必要である。
- ②カリウムの含有率がわかれば、イライト化の予測が可能である。その流れや広がりパターンに依存するが、150℃以下では完全にイライト化するのに100万年以上の期間が必要である。
- ③70℃から150℃の温度での熱水作用の主な実質的効果としては、非可逆的な微細構造の再組織化である。
- ④150℃以上の高温における熱水作用の短い期間(数千年)での主要な実質的効果は珪酸結合(silica cementation)である。

などの予備的結論が得られている。

(2) 現地発生材

現地発生材については、地層が本来有する性能と同等かあるいはそれ以上にするという考えから、健全な母岩より切出したものや破碎して圧縮した形のもの等を使用することになる。これらは主として機械的な強度を狙ったものであり、長期安定性についても、埋め戻し材が化学的に周辺岩盤に影響を与えないという点でも大きな長所を有するものである。

結晶質岩においては、コンクリートなどの構造用材料に比較しても十分な強度があるが、堆積岩については、機械的強度をそれほど期待できない。しかし、その岩石が持つ性質によっては、シーリング材として使用できる可能性もある。

現地発生材は、母岩と同じ性質を持つので、材料としては好ましいものであるが、切出すにしても圧縮固化するにしても、ブロックを作成しそれを組上げるという形をとるので、コンクリートのように一体施工ができず、断面形状にあった加工やブロック間の接着等の問題が挙げられることになる。特に大きな問題となるのは、結晶質岩において発破を使用した掘削面では、凹凸が存在することから、ブロック積みによっては岩盤との隙間を完全に充填することは難しいものと考え

られることである。スイスではこの問題に対してベントナイトパウダーを吹込むという考え方を採用している。また経済性の面で現地発生材は、一般に他の材料に比べて安価と考えられるが、切出し整形または破碎圧縮整形を必要とすることもコストの上で考慮しておく必要がある。この他に、発生材を粒度調整した上充填する方法も提案されている。これらは全て埋め戻し量が膨大になることから、経済的側面の検討も加味されている。

3.1.2 ベントナイトの材料特性

(1) 単一材料特性

ここでは、Naベントナイトを用い、埋め戻し材としての適用性を評価するための基礎データとなるベントナイトの基本特性について以下に述べる。

1) 密度

圧縮応力の異なる場合の密度と圧縮応力の関係を図3.1-1に示す。この図から圧縮応力が低い範囲では密度の増加度合いが大きいですが、圧縮応力が大きくなるに従ってその度合いは小さくなる。圧縮して密度を増大させる場合の密度の最大値（限界値）は 2.3g/cm^3 程度と判断した。また、密度と含水比との関係を図3.1-2に示す。密度が最大となる含水比は圧縮応力によって異なり、圧縮応力が高いほど含水比は低くなるが、最適含水比としては $7\% \sim 14\%$ の値である。⁵⁾

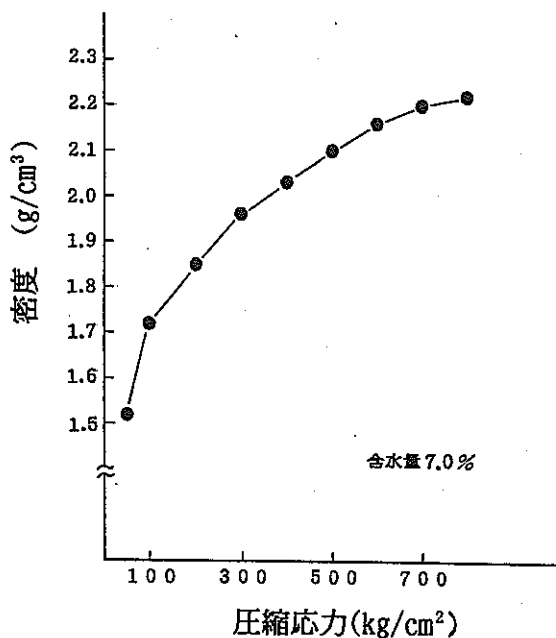


図3.1-1 圧縮応力と密度の関係

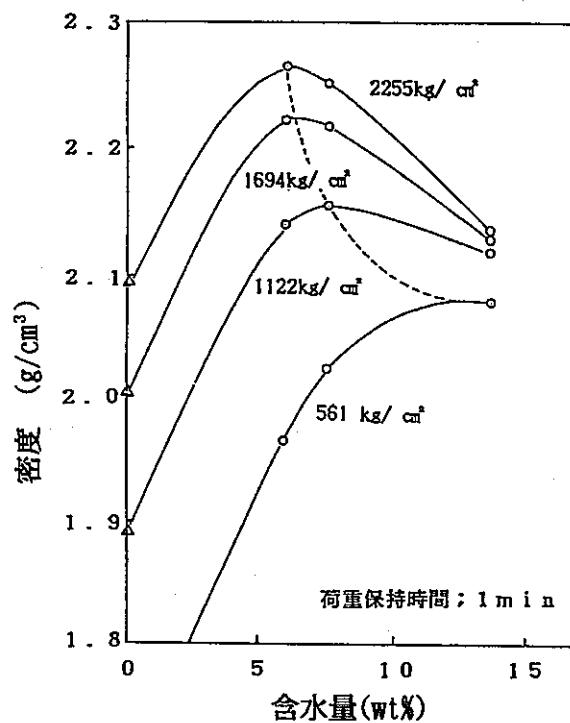


図3.1-2 圧縮応力を変えた場合の含水率と密度の関係

2) 力学的特性

埋め戻しに作用する外力としては、水圧、地圧、地震力等、さらに、長期間には地質構造の変化に伴う応力の不均衡等も考えられる。このような外力または外力の変化に対して耐えうる力学的特性、すなわち圧縮強度、剪断強度等を持つことが要求される。

一軸圧縮強度及び圧裂引張り強度と圧縮ベントナイトの密度との関係を図3.1-3に示す。また、剪断強度については、次の近似式より求め表3.1-3に示すような結果が得られた。⁵⁾

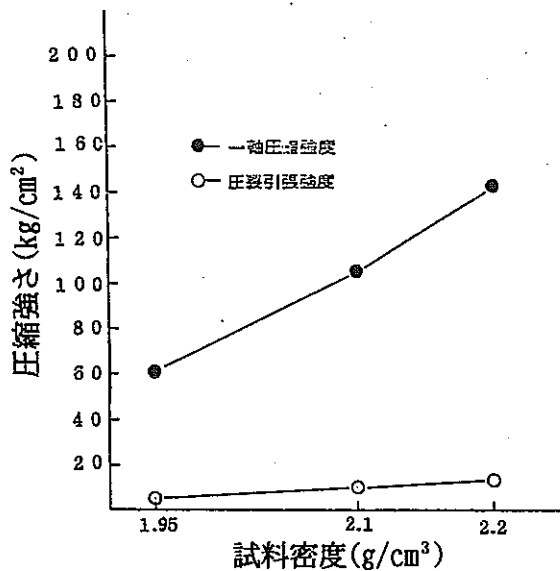
$$\tau_0 = \frac{\sigma_t \cdot \sigma_c}{2\sqrt{(\sigma_t(\sigma_c - 3\sigma_t))}}$$

τ_0 ; 剪断強度

σ_t ; 一軸圧縮強度

σ_c ; 圧裂引張り強度

表3.1-3 剪断強度の計算値



試料密度 (g/cm³)	試料	剪断強度 (注) (kg/cm²)
1.72	1	3.77
	2	5.65
	3	4.27
	平均	4.56
1.95	1	10.91
	2	10.24
	3	12.26
	平均	11.14
2.10	1	19.01
	2	20.62
	3	17.87
	平均	19.17
2.20	1	23.58
	2	27.47
	3	25.34
	平均	25.46

図3.1-3 密度と力学的強度の関係

これらから力学強度は圧縮ベントナイトの密度の増加に伴って増大し、一軸圧縮強度で20~140Kgf/cm²程度、引張強度で6~14Kgf/cm², 剪断強度で5~25 Kg/cm²程度の強度が得られた。⁵⁾

また、図3.1-4に示すように弾性波速度は密度の増加とともに増大しており、P波速度は0.7~1.3km/s、S波速度は0.4~0.8km/sの値が得られた。

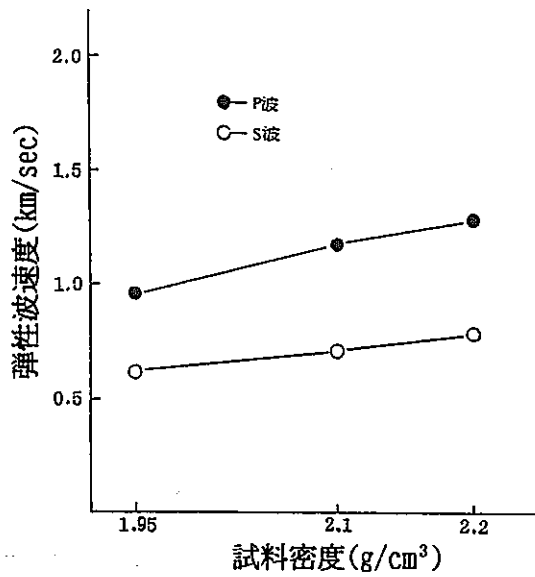


図3.1-4 密度と弾性波速度の関係

3) 透水特性

透水係数の測定結果を図3.1-5に示すとともに図中にはPusch及びHodgesらの測定結果を併記した。図3.1-6にはPusch³⁰⁾のデータを示しているが、密度と透水係数との間の相関は双曲線の傾向を示している。この結果より、圧縮ベントナイトの透水係数はその密度に影響される傾向を示し、ストリパでの結果と同様な結果が得られている。また、圧縮ベントナイトの透水係数は、 $10^{-10} \sim 10^{-14}$ cm/secの値である。⁵⁾

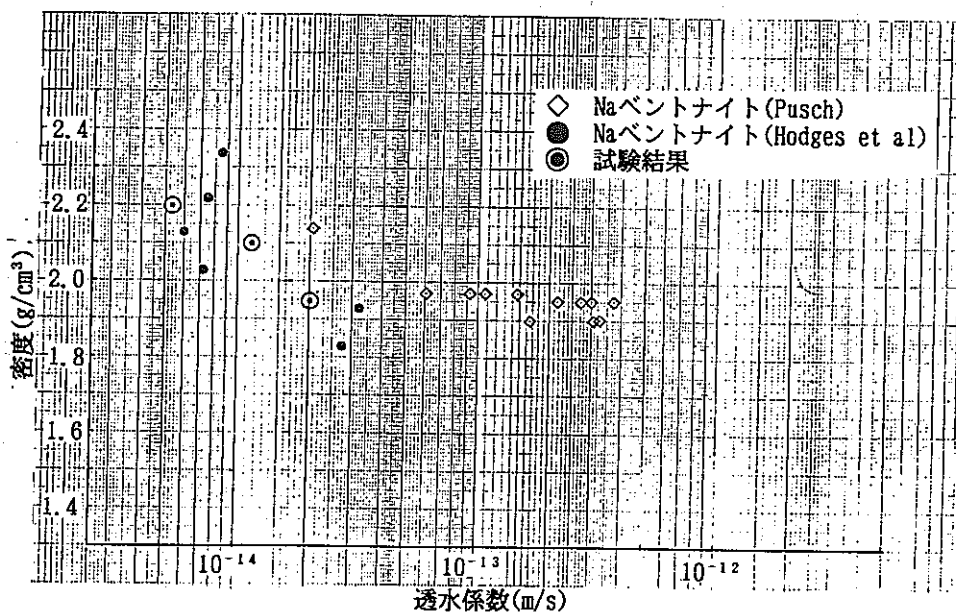


図3.1-5 密度と透水係数の関係

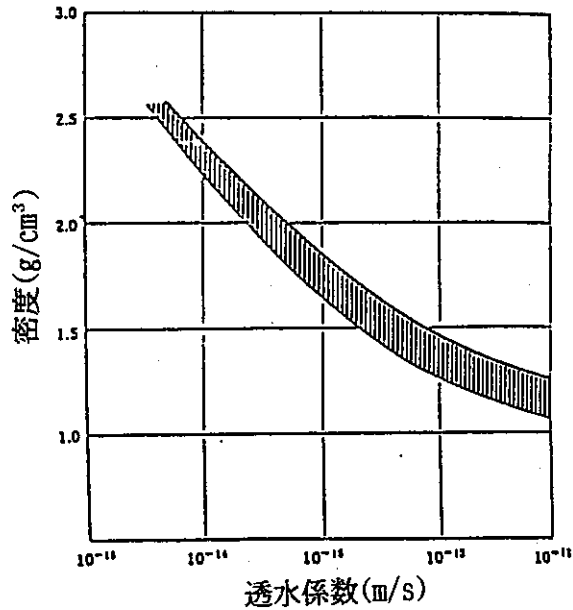


図3.1-6 密度と透水性係数の関係

4) 熱伝導率

ベントナイトのような粘土鉱物は、一般に周囲の岩石より熱伝導率が低い場合が多い。しかもその密度や含水率に熱伝導率が依存し、それらの増加とともに熱伝導率が增大する。したがって、熱による変質（イライト化、バイデライト化）を抑制するためには、安定した熱収支を保ち適正な熱伝導率を決定する必要がある。

圧縮ベントナイトの密度を変えた場合の有効熱伝導率を図3.1-7に、(財)工業開発研究所¹¹⁾における試験結果を図3.1-8に示す。有効熱伝導率は密度とともに増大しておりこの結果は高密度になるほど著しい。その値は0.6 ~ 1.0Kcal/mh°Cの値である。同研究所の試験結果によるとヒーターの出力を変化させた時の有効熱伝導率の差は低密度で明瞭に表れ、有効熱伝導率の温度依存性に対して主に空隙中に存在する空気を媒体とした熱移動の温度依存性が反映されていることを示唆しているという結果が得られている。

また、一般的に圧縮ベントナイトの熱伝導率と温度あるいは密度の関係は、温度の上昇に伴って熱伝導率は低下し、密度の増加に伴って増大する傾向にある。⁵⁾

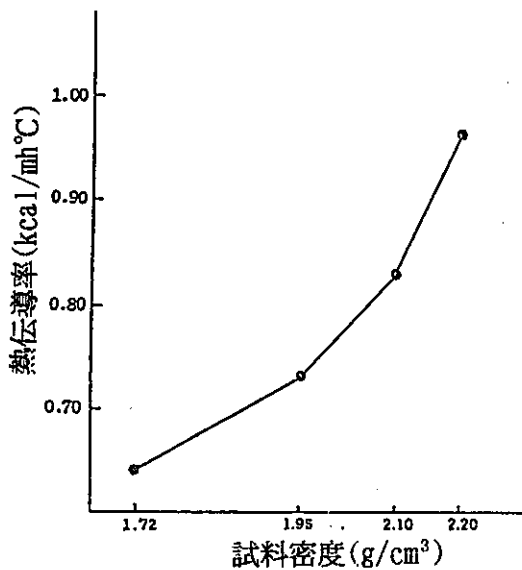


図3.1-7 密度と熱伝導率の関係

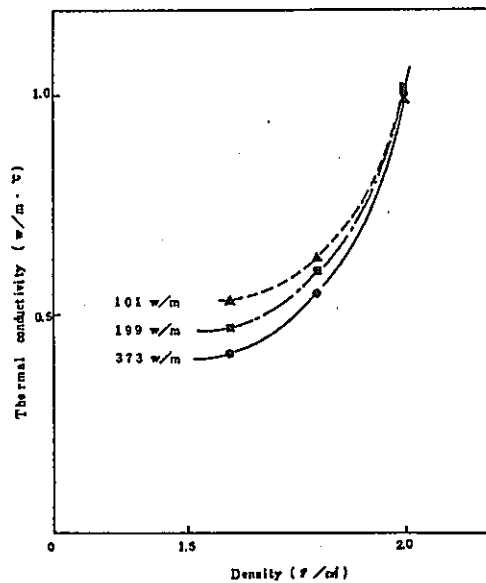


図3.1-8 密度と熱伝導率の関係
(財工業開発研究所での試験結果)

5) 膨潤特性

圧縮ベントナイトの膨潤特性を示す一例として、図3.1-9に経過日数と膨潤率の関係を示す。これより圧縮ベントナイトは水に接触すると急激に膨潤を始め、膨潤率が100~120%になるとその伸びが鈍化し、約40日で圧縮ベントナイトの体積が倍以上になる。また、図3.1-10に乾燥密度をパラメータとした経過日数と膨潤圧の関係を示すが、この図からも明らかなように密度の増加に伴って膨潤圧が大幅に増大し、最大約30Kg/cm²程度の結果が得られた。⁶⁾

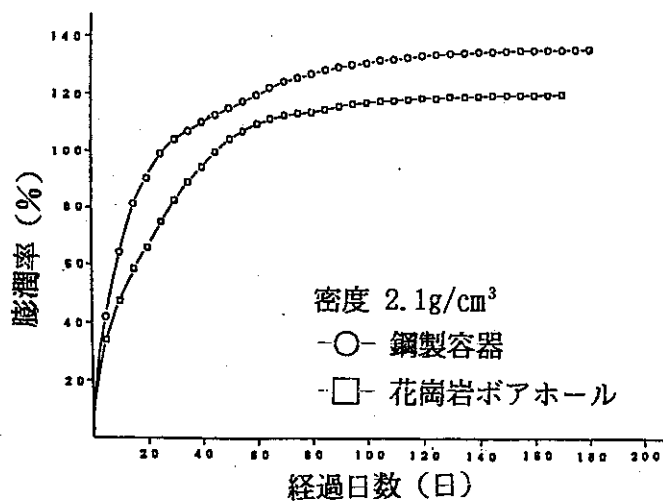


図3.1-9 圧縮ベントナイトの膨潤量と経過日数の関係

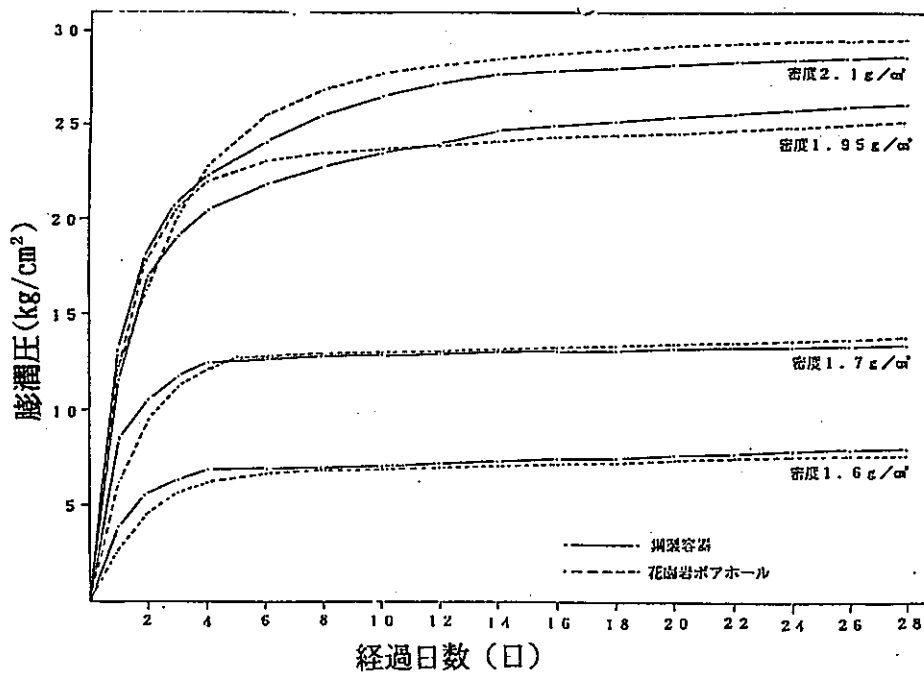


図3.1-10 圧縮ベントナイトの膨潤圧と経過日数の関係

(2) 複合材料特性

熱伝導率が低い、強度が小さい等のベントナイト単一材料としての欠点を補う目的から他の材料を混合した複合材料が検討されている。ここでは、ベントナイト+珪砂とベントナイト+泥岩粉との場合の特性について以下に述べる。

1) 力学的特性

一軸圧縮強度及び圧裂引張り強度と圧縮ベントナイトの密度との関係を図3.1-11~14に示すとともに、内部摩擦角及び付着力と密度との関係を図3.1-15、16に示す。

全体的に密度の増加にともなって強度等も増加する。混合率の影響については、珪砂と泥岩粉とは全く逆の傾向を示す。泥岩粉の改善効果はかなり期待できる結果を示し一軸圧縮強度では50~250Kgf/cm² (単一材料の1.8倍程度)、引張強度で4~15Kgf/cm² 程度の結果が得られた。⁶⁾

また、珪砂10、50%、泥岩粉10、50%混合試験体の試験体温度とP波速度の関係を図3.1-17~20に示す。これらの結果から各試験体ともに試験体の温度上昇にともない僅かにP波速度は増加傾向を示すが、その増加率は少なく工学的にみればほぼ一定とみなすことができる。その値は、珪砂の場合0.6~1.0Km/s(混合率50%では、0.5Km/s程度)、泥岩粉の場合0.7~1.2Km/s(混合率50%では、1.1Km/s前後)という結果が得られた。⁶⁾

2) 熱伝導率

ベントナイトに珪砂及び泥岩粉を混合した場合の密度と熱伝導率との関係を各々の混合率をパラメータにとって図3.1-21に示す。この結果から明らかなように、ベントナイト混合試験体は単独試験体と同様に密度の増加に伴って熱伝導率は増加する。また、珪砂を混合した場合は0.6 ~ 1.2 Kcal/mh°C程度であるが、泥岩粉については密度による影響が支配的であるという結果が得られた。

6)

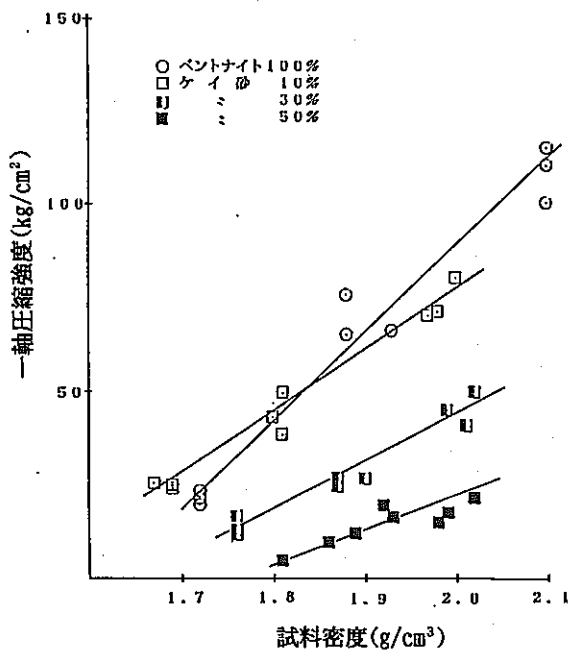


図3.1-11 密度と一軸圧縮強度の関係
(ベントナイト+けい砂)

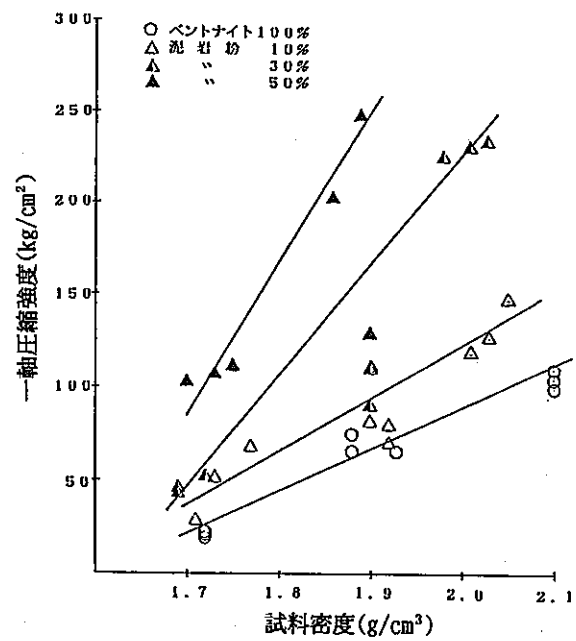


図3.1-12 密度と一軸圧縮強度の関係
(ベントナイト+泥岩粉)

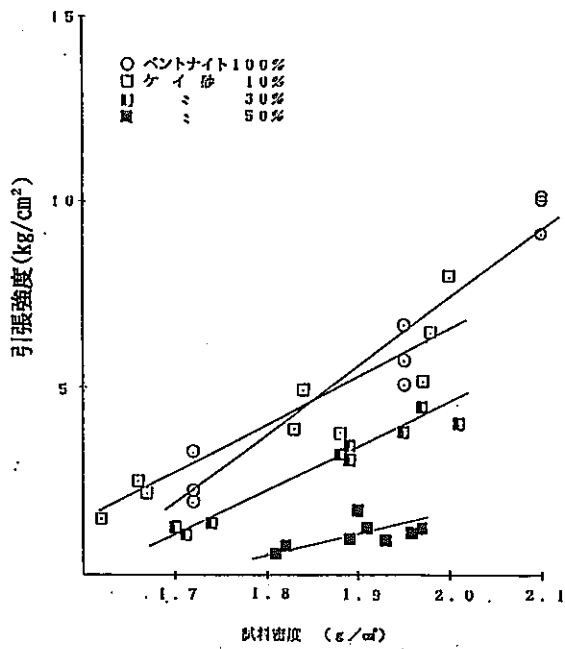


図3.1-13 密度と引張強度の関係
(ベントナイト+けい砂)

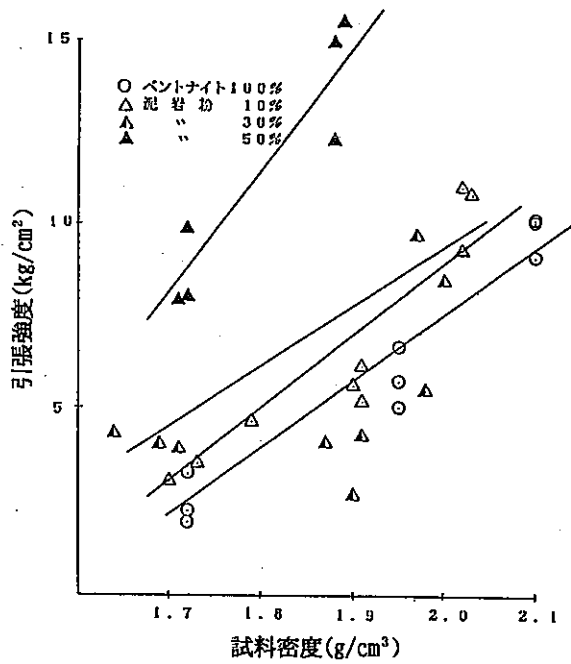


図3.1-14 密度と引張強度の関係
(ベントナイト+泥岩粉)

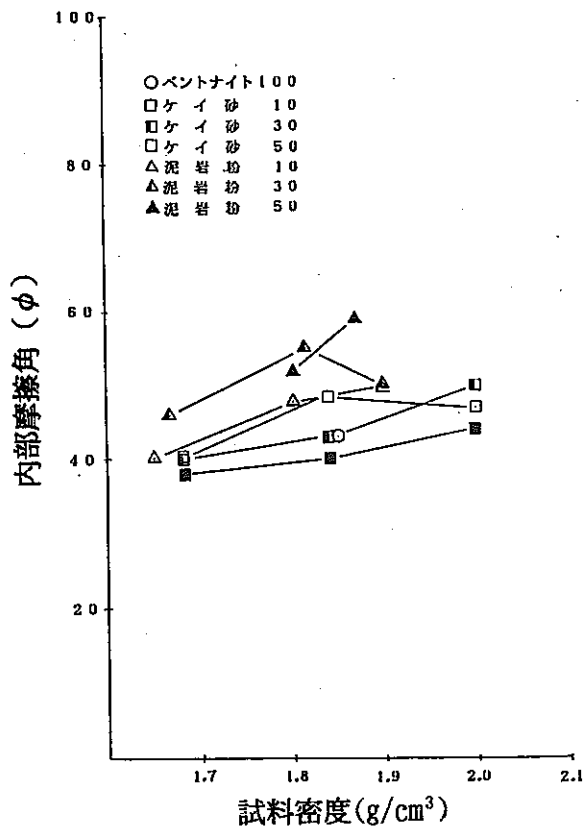


図3.1-15 密度と内部摩擦角の関係

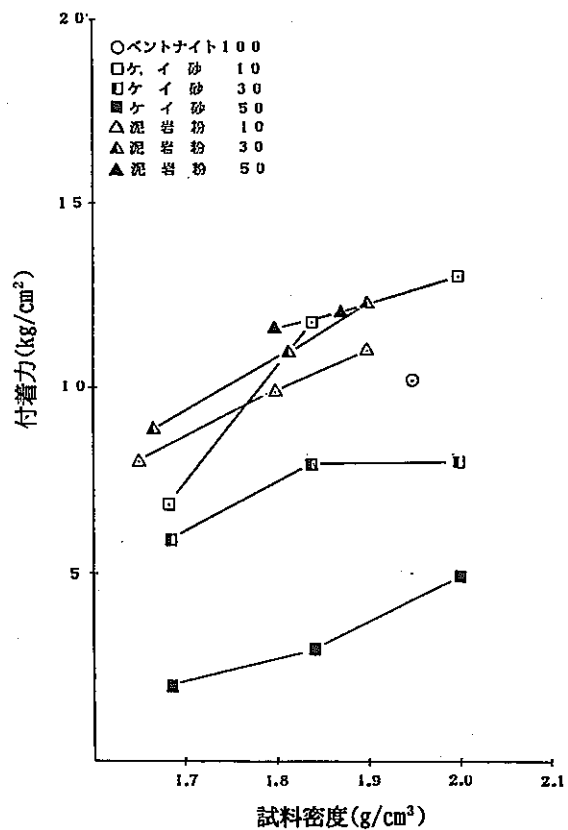


図3.1-16 密度と付着力の関係

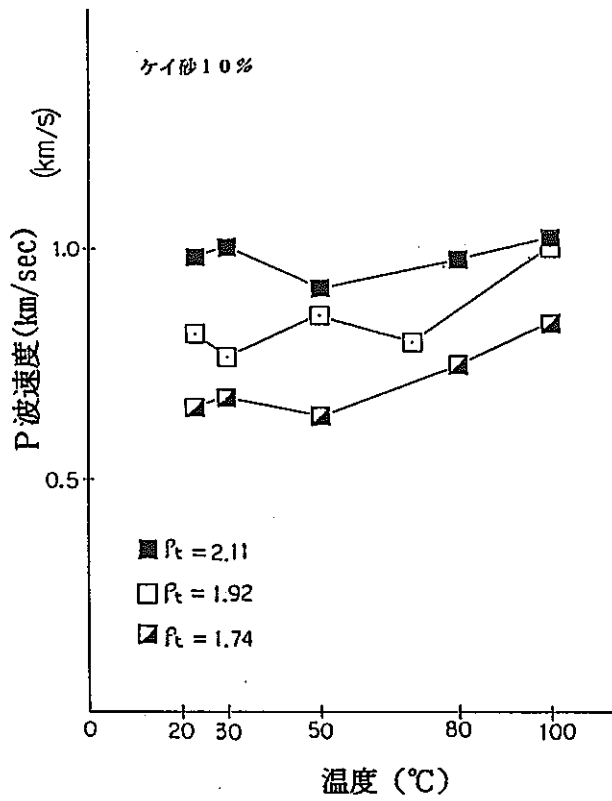


図 3. 1 - 17 試験体温度と P 波速度の関係
(けい砂 10% の場合)

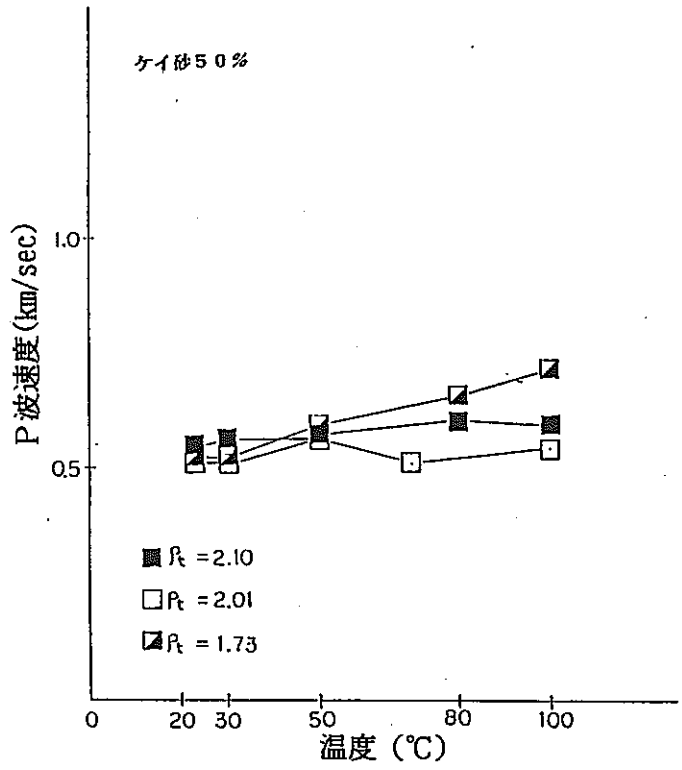


図 3. 1 - 18 試験体温度と P 波速度の関係
(けい砂 50% の場合)

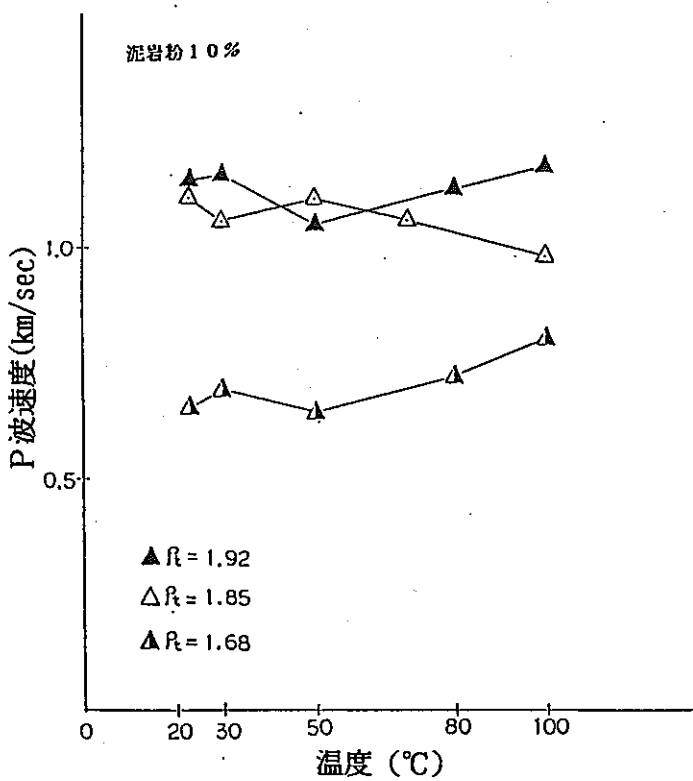


図 3. 1 - 19 試験体温度と P 波速度の関係
(泥岩粉 10% の場合)

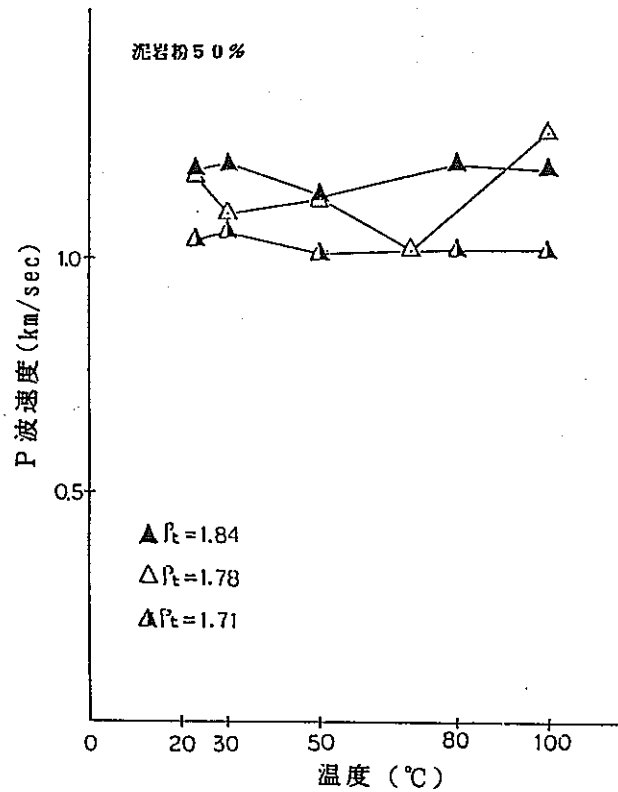


図 3. 1 - 20 試験体温度と P 波速度の関係
(泥岩粉 50% の場合)

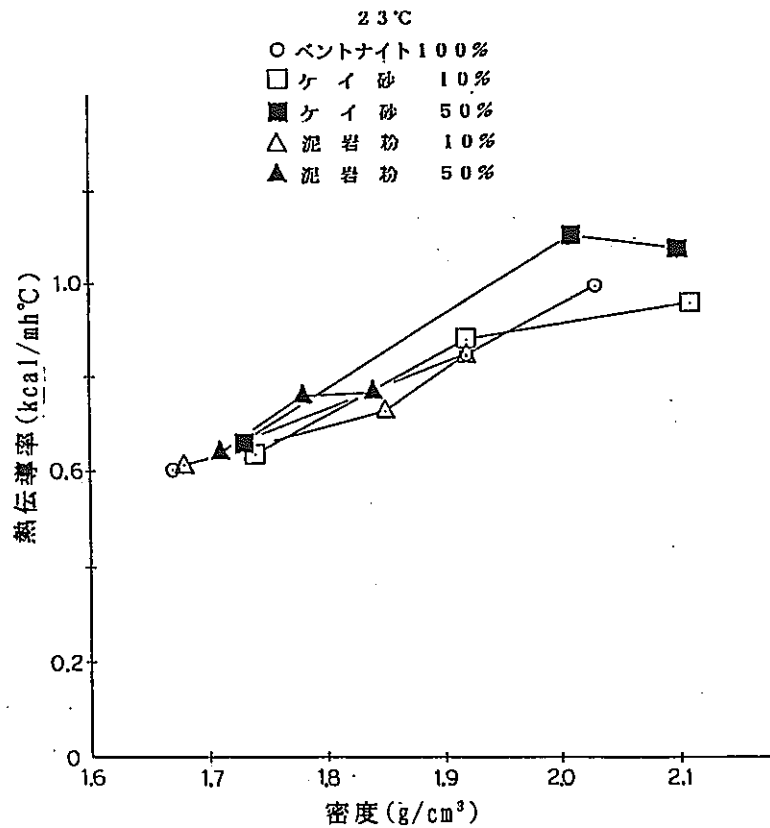


図 3.1 - 21 密度と熱伝導率の関係

(3) 膨潤特性

試験体の密度と膨潤圧の関係を図 3.1 - 22 に示す。この結果で明らかなように、ベントナイト単一材料の場合と同様に、その混合試験体は密度の増加に伴って膨潤圧は大幅に増加する。各密度での膨潤圧は混合率により異なり、混合率が大きいほど膨潤圧は低くなるという結果が得られた。⁶⁾

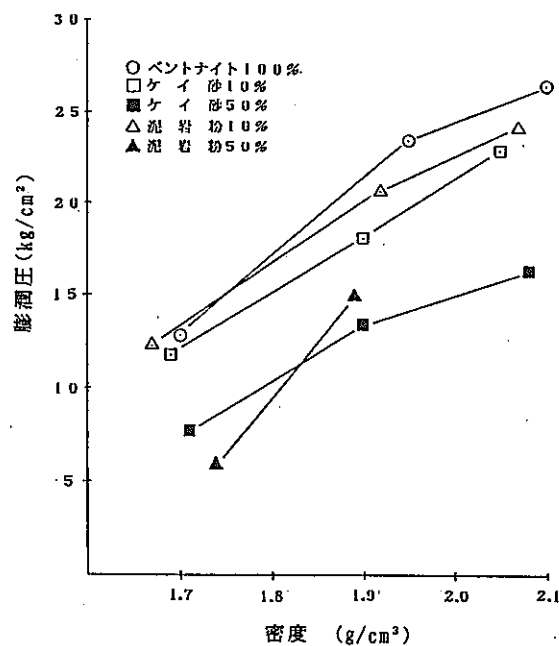


図 3.1 - 22 密度と膨潤圧の関係

3.2 基本仕様

3.2.1 前提条件

ここでは、後述する施工計画を検討する際の基本となる埋め戻し仕様を設定するものである。

その際、我が国においては現在はサイト及び処分形態を特定していないことから、以下の3ケースを設定した。

表3.2-1にこれらのケース毎の処分形態を、図3.2-1にレイアウトを示す。

- ① 結晶質岩，深度1,000m，処分孔縦置き方式
- ② 結晶質岩，深度1,000m，坑道横置き方式
- ③ 堆積岩，深度500m，坑道横置き方式

表3.2-1 処分場仕様

	結晶質岩 処分孔縦置き	結晶質岩 坑道横置き	堆積岩 坑道横置き
アクセス坑道	円形φ6.5m 6本	円形φ6.5m 6本	円形φ6.5m 6本
処分坑道	幌形5m×5m 31本/1区画	円形φ3m 31本/1区画	円形φ3m 31本/1区画
主要坑道及び 連絡坑道	幌形5m×5m 8本	幌形5m×4m 8本	変円形5m× 4.5m 8本
処分区画数	8区画	8区画	8区画

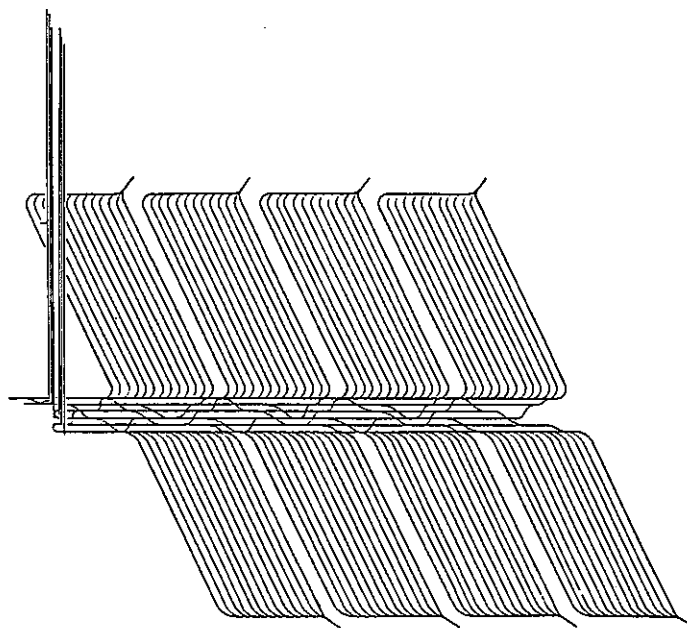


図3.2-1 処分場レイアウト

3.2.2 埋め戻し仕様

埋め戻しにおいて要求される機能は、①処分坑道、主要坑道、アクセス坑道を経由する地下水の侵入と核種の移行を抑制すること、②周辺岩盤の挙動に追従することである。埋め戻しの対象となる部位は処分坑道、主要坑道、アクセス坑道であり、坑道横置き方式の場合は、緩衝材によって埋め戻されるので処分坑道は対象とならない。ここでは、処分孔縦置き方式を基本にその仕様を示すものである。

(1) 処分坑道

処分坑道の埋め戻し対象となる処分形態は、処分孔縦置き方式の処分場であり、幌型断面の坑道が対象である。

処分孔縦置き方式の処分坑道には、処分孔が配置され処分孔内に定置された廃棄体からの発熱の影響も受けることを考慮した埋め戻し材料の仕様を検討する必要がある。その他にも、「2.シーリングに要求される機能」で記述した性能を満足することが必要となる。

諸外国での研究等を参考に結晶質岩内の処分坑道の埋め戻しに関する基本仕様を以下のように設定する。³¹⁾

〔材料〕

材 料	ベントナイトと砂の混合材料 ・坑道上部（ベントナイト 30%，砂 70%） ・坑道下部（ベントナイト 20%，砂 80%）
透水係数	周辺岩盤と同等もしくは1オーダー低い透水係数
一軸圧縮強度	1.0 kg/cm ² 以上
熱伝導率	0.3 ~0.9 kcal/mh °C
密 度	1.3 ~1.6t/m ³

〔施工〕

坑道下部	埋め戻し材料の転圧締固め
坑道上部	埋め戻し材料の吹き込み

材料特性は、施工方法によって左右されることから、ここでいう基本仕様は施工完了段階で達成されると考えられる仕様である。

坑道上部は、締め固め機械の制約から施工ができないことが予想されることから、上部に残される空間は粉体、粒状の混合材料を吹き込むことによって所定の仕様を満足するようにベントナイト、砂の配合を調整する。また、処分坑道において部分的に施工されているコンクリート製のライニングは、長期耐久性の観点から埋め戻し施工に際して撤去する。図3.2-2に今回設定した処分坑道の埋め戻し構造を示す。³¹⁾

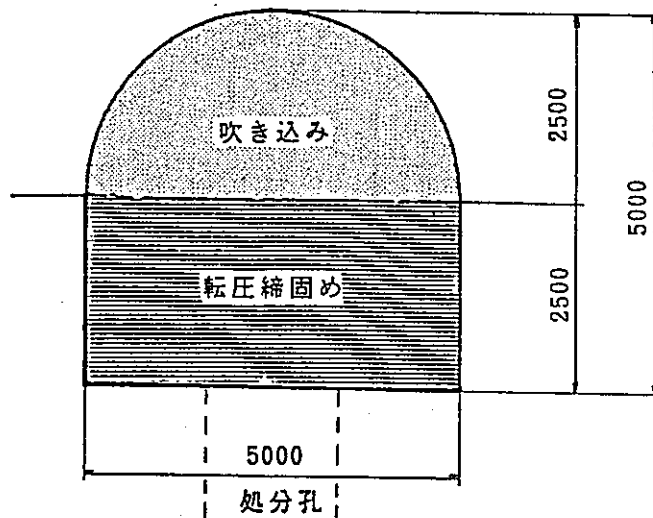


図3.2-2 設定した処分坑道の埋め戻し構造

(2) 主要坑道

主要坑道の埋め戻しに要求される性能としては、処分坑道における性能と基本的に同様と考えられることから、処分坑道における埋め戻しと同様の材料を適用することとする。また主要坑道に設置されている支保、覆工材は周辺岩盤との空隙をなくす処置を十分に行い、プラグ設置箇所を除いてそのままの状態での埋め戻しが行われる。図3.2-3に今回設定した主要坑道の埋め戻し断面を示す。³¹⁾

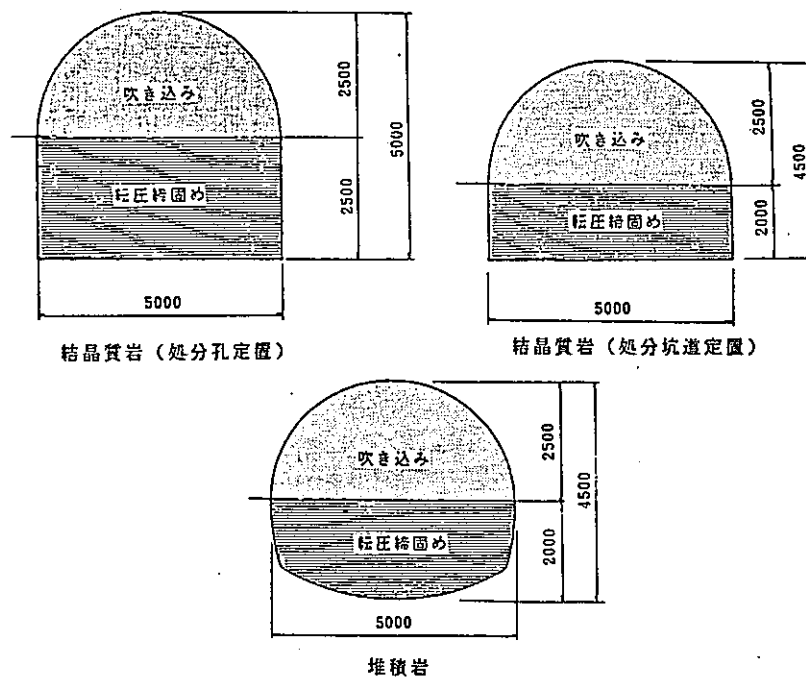


図3.2-3 設定した主要坑道の埋め戻し断面

(3) アクセス坑道

アクセス坑道の埋め戻しに要求される性能は、主要坑道の埋め戻しと基本的に変わらない。アクセス坑道は、地下の処分施設と地表とを垂直に連結する構造となることから、埋め戻し材の施工に関しては水平坑道と異なり、垂直方向の締め固めが容易となる。

立坑の埋め戻しは、下部から順次締め固めて施工することになり、必要に応じて埋め戻し材の緻密性を良くするために、プラグを兼ねた水平の隔壁を順次設置することを考慮する必要があると考えられる。材料については、諸外国の検討例では掘削ブリの利用も考えられているが、今回は以下のように設定し（主要坑道とは異なり配合調整しない）、ライニングの問題については、主要坑道と同様に空隙を確実に充填する処置を行って埋め戻す計画としている。施工方法としては、主要坑道と異なり全て転圧締め固めで行うこととしている。³¹⁾

材 料	ベントナイトと砂の混合材料
透水係数	周辺岩盤と同等もしくは1オーダー低い透水係数
一軸圧縮強度	10 kg/cm ³ 以上
密 度	1.3 ~1.6t/m ³

3.3 施工

ここでは、「3.2 基本仕様」で述べたシーリングの基本仕様及び前提条件を基にその施工計画を示すものである。

3.3.1 基本的手順

処分場の閉鎖はパネル単位での建設、操業、監視作業と並行して実施され、各パネルの処分坑道の閉鎖から開始し最終的にアクセス坑道の閉鎖によって終了する。

処分区画での作業手順は、31本の処分坑道を順次埋め戻し、両端にプラグを設置し、処分坑道が全て閉鎖された後に処分坑道を取り巻く主要坑道の埋め戻しを開始する。

主要坑道の埋め戻しが完了後に連絡坑道との接続部にプラグを設置して処分パネルの閉鎖が完了する。全体の閉鎖基本手順を以下に示す。

閉鎖の基本手順

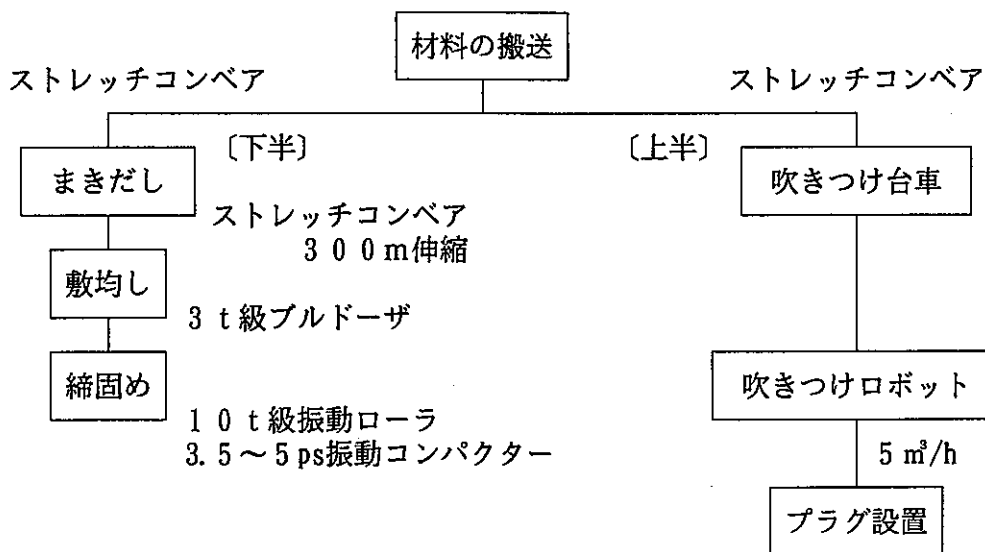
項 目	ス ケ ジ ュ ー ル							
・ 処分坑道閉鎖	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
	{ 31	{ 31	{ 31	{ 31	{ 31	{ 31	{ 31	{ 31
・ 主要坑道閉鎖	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑
・ 連絡坑道閉鎖					(④⑤パネル前面の坑道)			
・ 坑底施設坑道閉鎖								
・ 立坑閉鎖								
	(建設用 2 本同時施工) (操業用 2 本同時施工) (閉鎖用 2 本同時施工)							

3.3.2 処分坑道の埋め戻し

(1) 結晶質岩

1) 処分孔縦置き方式

結晶質岩対象の処分場での処分坑道の閉鎖手順は、以下に示す様に坑道の埋め戻し完了後、坑道両端にプラグを設置して閉鎖は終了する。



処分坑道の下半は埋め戻し材の転圧締固めによって行い、締固め機械の入れない上半部は吹付けロボットを使った吹き込み施工によって埋め戻す。

振動締固め機械の寄付きができず、締固め効率の悪い岩盤近傍の50cm程度の範囲は振動ローラーに装着した振動コンパクターによって確実に締固めすることとする。埋め戻し材の施工要領を図3.3-1に示す。³¹⁾

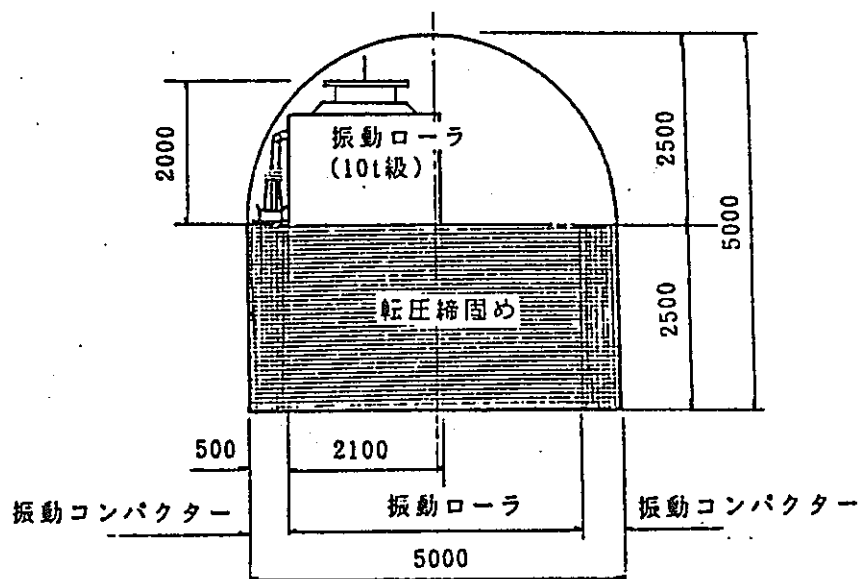


図3.3-1 処分坑道埋め戻し施工要領図

締固め機械と転圧効果については、材料の弾性やダンピング効果などに左右され一概に最適設計をすることが難しく、また埋め戻し材料の施工試験のデータもないことから、締固めは1層当たり20cmまきだし、15cmの仕上げ厚さまでに10t級振動ローラーで6回転圧することによって所定の密度 $1.3 \sim 1.6 \text{ t/m}^3$ を

得ることが可能と設定した。

吹付けロボットについても同様に埋め戻し材の試験施工データがないことから、コンクリート吹付け機の施工実績から判断して $5\text{ m}^3/\text{h}$ 程度の埋め戻し材の吹き込みが可能と設定した。施工区画は、坑道を左右に分割し1区画長さをストレッチコンベアの伸縮可能距離から300mと設定した。また施工は片側でまきだし、片側で転圧締め固めを同時に施工する方法とした。施工区画割りに基づく1層当たりの埋め戻しサイクルタイムは以下のようになる。³¹⁾

項目	時間 (分)	
①材料搬入巻きだし	20 (40)	伸縮コンベア巻きだし機 ($150\text{ m}^3/\text{h}$) 3 t級ブルドーザ 10 t級振動ローラ (6回転圧) 岩着部は振動コンパクター
②敷ならし	(20)	
③転圧締め固め	40	
サイクルタイム	60	①と②は同時並行作業

また吹き込み施工のサイクルタイムは $5\text{ m}^3/\text{h}$ の吹きつけロボットが1切り羽に2台入って施工するものと設定し、処分坑道は100mあたりの吹き込み量 980 m^3 からサイクルタイムは98時間となる。³¹⁾

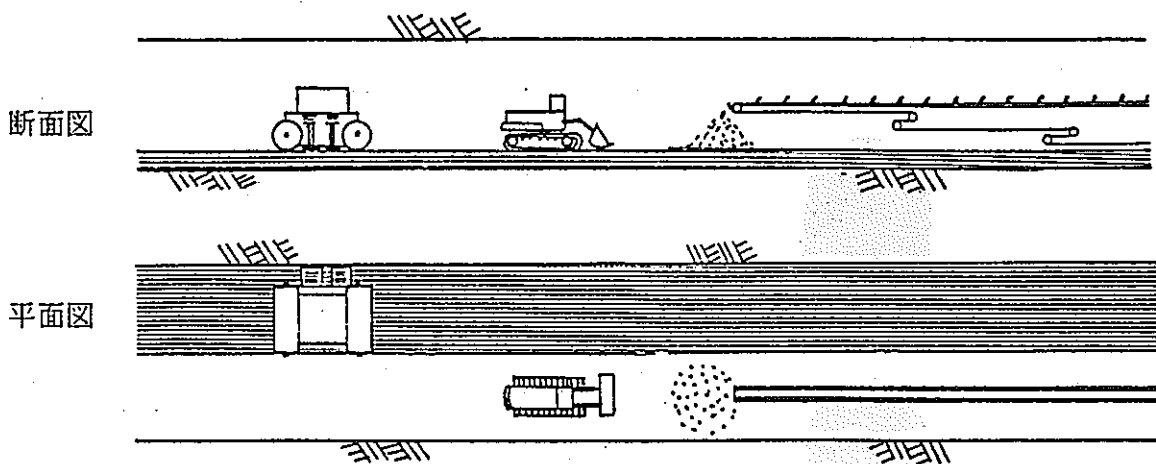


図3.3-2 埋め戻し部施工概要

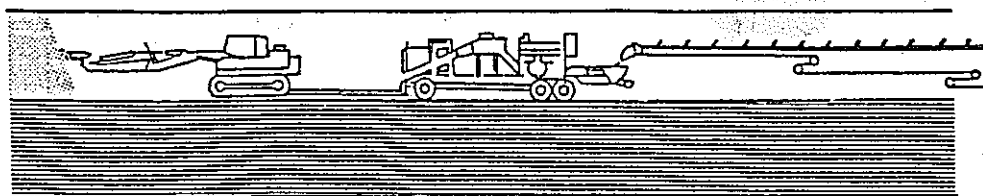


図3.3-3 吹き込み部施工概要

2) 坑道横置き方式

坑道横置き方式の場合は、廃棄体の設置に伴って緩衝材が処分坑道内に設置されていくことから、埋め戻しという行為は発生しない。

(2) 堆積岩


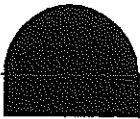

結晶質岩における坑道横置き方式と同様に埋め戻しという行為は存在しない。

3.3.3 主要坑道の埋め戻し

主要坑道は1パネル分の処分坑道を閉鎖した後に作業を行うことになり、切羽面が少ないこともあって工程的な調整は埋め戻し、プラグの施工能力が直接的に影響してくる。主要坑道の埋め戻しは、基本的に処分坑道の埋め戻しと同様の施工手順、施工方法によって施工する。

結晶質岩（処分孔縦置き、坑道横置き）、堆積岩（坑道横置き）の主要坑道の距離は同じであるが、坑道の断面形状がそれぞれ異なるため締め固め層数が異なり、埋め戻しサイクルタイムも若干異なったものになる。表3.3-1にそれぞれの主要坑道の埋め戻し工期を示す。³¹⁾

表3.3-1 主要坑道埋め戻し工期

形式	断面	施工法	所要工期（1パネル当たり）
結晶質岩	処分孔定置 	①転圧締め固め 15cm×17層 ②吹き込み 98㎡	(1)短辺（500m） ①+②=4+29= 33日 (2)長辺（1200m） ①+②=9+68= 77×2 本 = 154 日
	処分坑道定置 	①転圧締め固め 15cm×10層 ②吹き込み 98㎡	(1)短辺（500m） ①+②=3+29= 32日 (2)長辺（1200m） ①+②=5+68= 73×2 本 = 146 日
堆積岩	処分坑道定置 	①転圧締め固め 15cm×14層 ②吹き込み 98㎡	(1)短辺（500m） ①+②=3+29= 32日 (2)長辺（1200m） ①+②=7+68= 75×2 本 = 150 日

3.3.4 連絡坑道の埋め戻し

連絡坑道の埋め戻しは、処分場全体の工程に支配され、処分場の最奥部のパネルが完全に埋め戻され、パネルへのアクセスの必要が完全になくなってから作業を開始する。閉鎖の進行は、図3.3-4に示すように4区画に分けて、他のパネルでの操業、監視、建設の進行にあわせて実施することになる。連絡坑道の埋め戻しは、基本的に主要坑道の埋め戻し、プラグ設置と同様の施工手順、施工方法によって施工することになる。³¹⁾

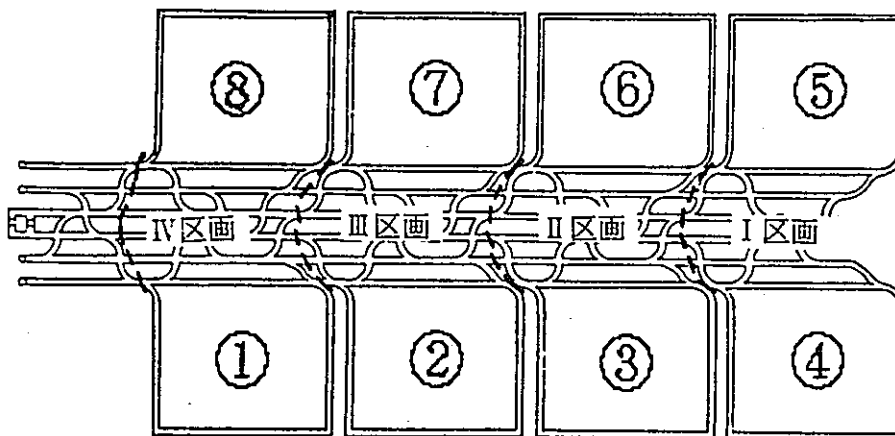


図3.3-4 連絡坑道の閉鎖作業区画割り

3.3.5 アクセス坑道の埋め戻し

立坑の埋め戻しは、基本的に主要坑道の埋め戻しと同様の施工手順、施工法によって施工され、立坑底から順次埋め戻し、必要とされる箇所に閉鎖プラグを設置しつつ坑口を最後に閉鎖し全ての閉鎖作業を終了する。

埋め戻しの締め固めは、主要坑道の埋め戻しと同様に20cm巻きだしたのち振動コンパクター2台を使用して10回転圧することで15cmまでの締め固めができるとし所要工期の算定を行った。1層あたり必要な締め固め時間は、立坑の断面から約1時間となる。

材料の搬入及び埋め戻し、閉鎖作業のために閉鎖立坑の坑口には建設時に使用したのと同様な立坑昇降設備一式を準備し、必要に応じて資材、機器の搬入を行うこととした。

1層の埋め戻し材の搬入、巻きだしに要する時間は0.5時間となり、埋め戻し部の1層締め固めに要する時間は計1.5時間になる。³¹⁾

3.4 機能評価

ここでは、まずシーリング全体の機能評価に係わる評価因子について述べ、次に埋め戻しの観点からの機能評価について示すものである。

3.4.1 評価因子

シーリングの機能を評価するためには、前述の材料特性に加え、地質及び水理条件といった地質環境特性、さらには、岩盤の掘削によって生じる緩み領域の範囲とその特性等が重要な因子となる。

第一に地質条件で主な因子となりうるものは岩盤特性であり、これは材料の選択及び設計上で非常に重要となる。例えば、自己閉鎖能力をもった塑性媒体のような岩盤では、シーリングに膨潤性材料を使用する必要がないかもしれないが、硬岩においては岩盤表面と十分な接触状態を保証するために、可塑性と膨潤性をもった材料が必要となる。

第二に地化学的条件としてきわめて重要なのは、岩石を形成する鉱物であるが、地下水やガスの発生もシステムの地化学的条件に影響する。特にシーリング後はその周囲に新たな地化学的環境が存在することになることから、地質環境の地化学的性質とシーリング部との相互作用に留意しなければならない。

第三に水理条件として、多様な地層中の地下水流動の明確化が立坑及び横坑のシーリングの評価において重要事項となる。

第四に応力場として、岩塊内に存在する応力は掘削時及びそれに伴って起こる緩み領域の生成と関係をもち、シーリング後も影響を及ぼす。応力履歴に追従できる機能を有しているのかどうかの評価のポイントとなる。

第五に熱環境条件としてシーリング材料と母岩の双方に対する熱、機械的な影響を評価する必要がある。例えば、各物質の異なった熱膨張がシールされた立坑等の縦方向の透水性を増加させるかもしれないということが考えられる。¹⁰⁾

3.4.2 閉鎖後の地下水流動

上記で述べた評価要因のうち、水理条件、熱環境条件、掘削条件を考慮して処分場から地表面に至る最短経路として予想される立坑ルート上の要素における流速の鉛直成分を用いたトラベルタイムの検討による、クリティカルとなるルートの評価、埋め戻し材の透水係数の及ぼす影響を解析的に考察した。

(1) 解析条件及びモデル

地下水が流動する要因としてガラス固化体からの発熱のみに着目し、地形はフラットで地質は均質、地下水は地表面にあるとする。また解析上、ガラス固化体40,000本の処分と処分場の閉鎖は瞬時に完了、同時にガラス固化体の発熱の影響が生じ始めると考え、その発熱量は処分場全体を処分総本数の発熱量に見合う等価な円盤状発熱源として考慮することとした。これらの解析条件を表3.4-1に示す。

解析モデルとしては、図3.4-1に示す軸対象モデルを考え、緩衝材の許容温度が100℃以下に収まるようガラス固化体の埋設密度を1本・1ヶ所/100m²とし、40,000本のガラス固化体を処分するのに必要な面積を有する円盤とするような処分場モデルである。立坑は処分場の中心に配置するものとし、その径は立坑本数5本分(φ6.5m×5本)に相当する面積に等価な径としてφ15mである。また、立坑周りの緩み領域については、この5本分に相当する掘削径の周囲5mを仮定した。¹⁸⁾

(2) 解析結果

図3.4-2～5にガラス固化体処分後10年,100年,1000年,10000年経過した時点での処分場周辺における流速ベクトル図を示す。この図によると、処分場周辺岩盤中の地下水は処分場からの発熱による影響を受け、熱対流を生ずることが認められる。

また、処分場中央に設けた立坑部分における流速は、周辺岩盤の一般部に比べ1オーダー速く、かつ鉛直上向きであることから、この立坑部分が水粒子のトラベルタイムを算出する上でクリティカルとなると判断される。

埋め戻し材の透水係数を緩み領域のそれより1オーダー高くしたケースを、表3.4-2に示すが、これから立坑部分の水粒子のトラベルタイムは緩み領域を通過するルートがクリティカルである。¹⁸⁾

一方、処分場からの発熱に加えて地形勾配の影響を同時に考慮して、動水勾配下での処分場周辺の熱・地下水連成解析による検討から、地形がもたらす動水勾配による地下水の流動の方が、処分場の熱による対流よりも支配的である。したがって、傾斜地形に対する性能評価上の熱的影響の重要性はそれ程大きいとは言えない。³¹⁾

緩み岩盤ルートの水粒子の移動に対して埋め戻し材の透水係数の及ぼす影響を評価するため、埋め戻し材の透水係数をパラメータに緩み領域ルートにおける水粒子の移動時間と移動距離を埋め戻し材の透水係数を横軸にとって図3.4-6、7に示す。¹⁸⁾

これによると、緩み領域における水粒子の移動状況は、緩み領域の透水係数によるのみではなく埋め戻し材の透水係数によっても若干の影響を受けることがわかる。すなわち、緩み領域の透水係数が同じでも、埋め戻し材の透水係数が大きくなるにつれ、水粒子の移動時間は短く移動距離は長くなる。したがって、直接的に移行ルートとならない場所であっても、その透水係数は小さい方が望ましいと考えられる。

表3.4-1 解析条件一覧表

基本 設定 条件	条件項目		解析条件			
	ガラス固化体の発熱量		表-I.2.1.2 及び 図-I.2.1.1 参照			
	ガラス固化体処分総量		40000本 (1ヶ所の処分場に処分するものとする)			
	中間貯蔵期間		30年間			
	ガラス固化体埋設密度		1ヶ所・1本 / 100m ²			
	トラベリングフォース		今年度はガラス固化体からの発熱の影響のみを考慮する。			
	地形条件		熱の影響のみを対象としているので、地形はフラットとする。			
解析 用 物 性 値	物性値		結晶質岩系		堆積岩系	
			健全母岩	緩み岩盤	健全母岩	緩み岩盤
	岩	透水係数 k (cm/s)	10 ⁻⁸ , 10 ⁻⁶ , 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶ , 10 ⁻⁴ , 10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁴
		空隙率 n (%)	1	5	20	30
		熱伝導率 λ (kcal/mh°C)	1.0, 2.5, 4.0	2.5	2.0	2.0
	盤	比熱 C (kcal/kg°C)	0.2	0.2	0.2	0.2
		熱容量 Cb (kcal/m ³ °C)	530	530	560	560
	埋 戻 し 材 ラ グ	透水係数 k	10 ⁻⁷ , 10 ⁻⁵ , 10 ⁻⁴ cm/s (プラグの透水係数は10 ⁻⁷ cm/s)			
		空隙率 n	33%			
		熱伝導率 λ	0.57 kcal/mh°C			
		比熱 C	0.27 kcal/kg°C			
		熱容量 Cb	630 kcal/m ³ °C			
	流 体	熱伝導率 λ	0.55 kcal/mh°C		} 代表値として、GL-1000mの初期地温 (45°C) に対応する値を示す。	
		比熱 C	1.0 kcal/kg°C			
		密度 ρ	0.99 g/cm ³			
		熱容量 Cb	990 kcal/m ³ °C			
		体積膨張率 β	0.42×10 ⁻³ 1/°C			
他	初期地温勾配	3°C/100m (地表面15°C)				
	大気との熱伝達率	15 kcal/m ² h°C				

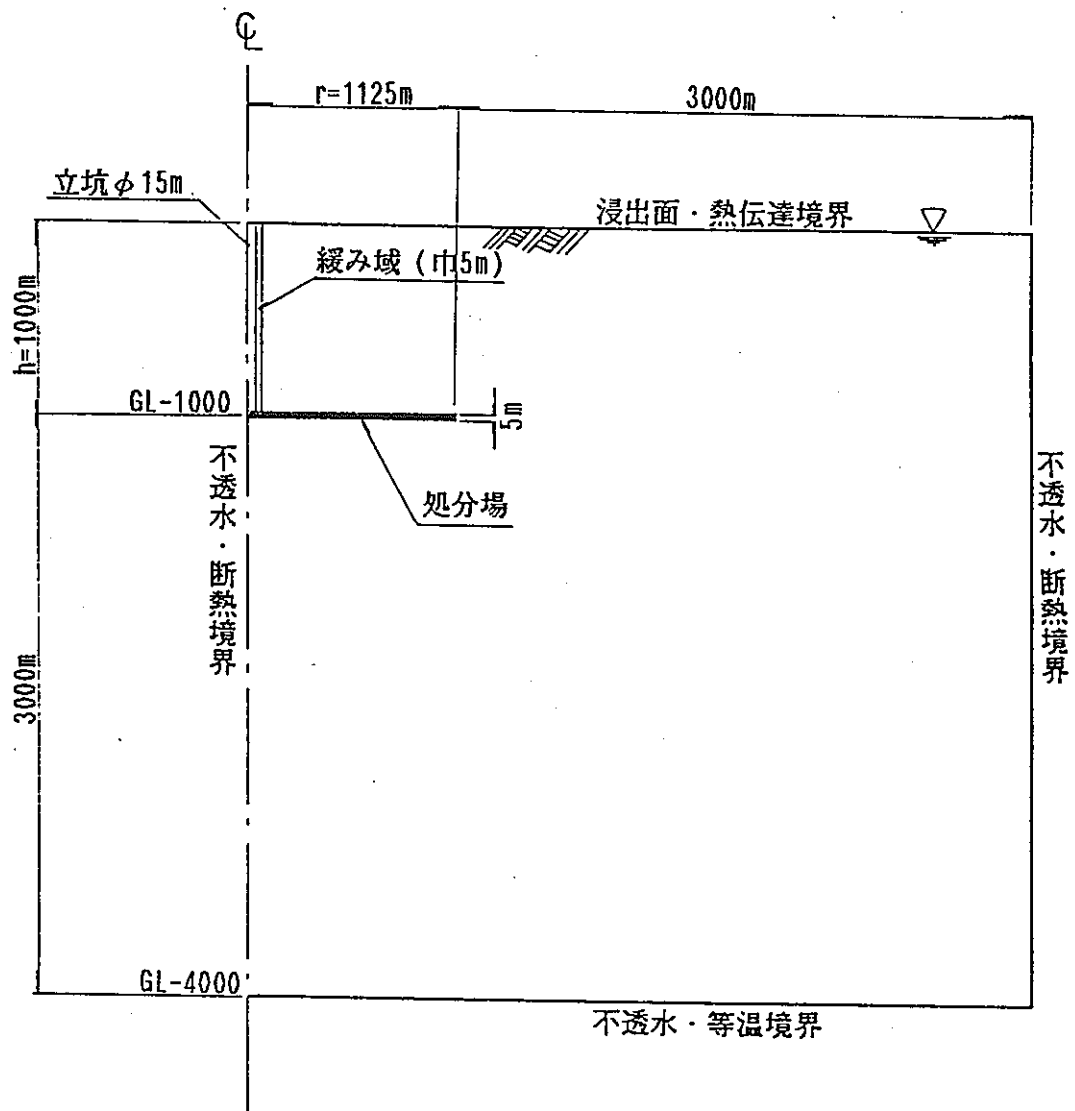


図3.4-1 解析モデル

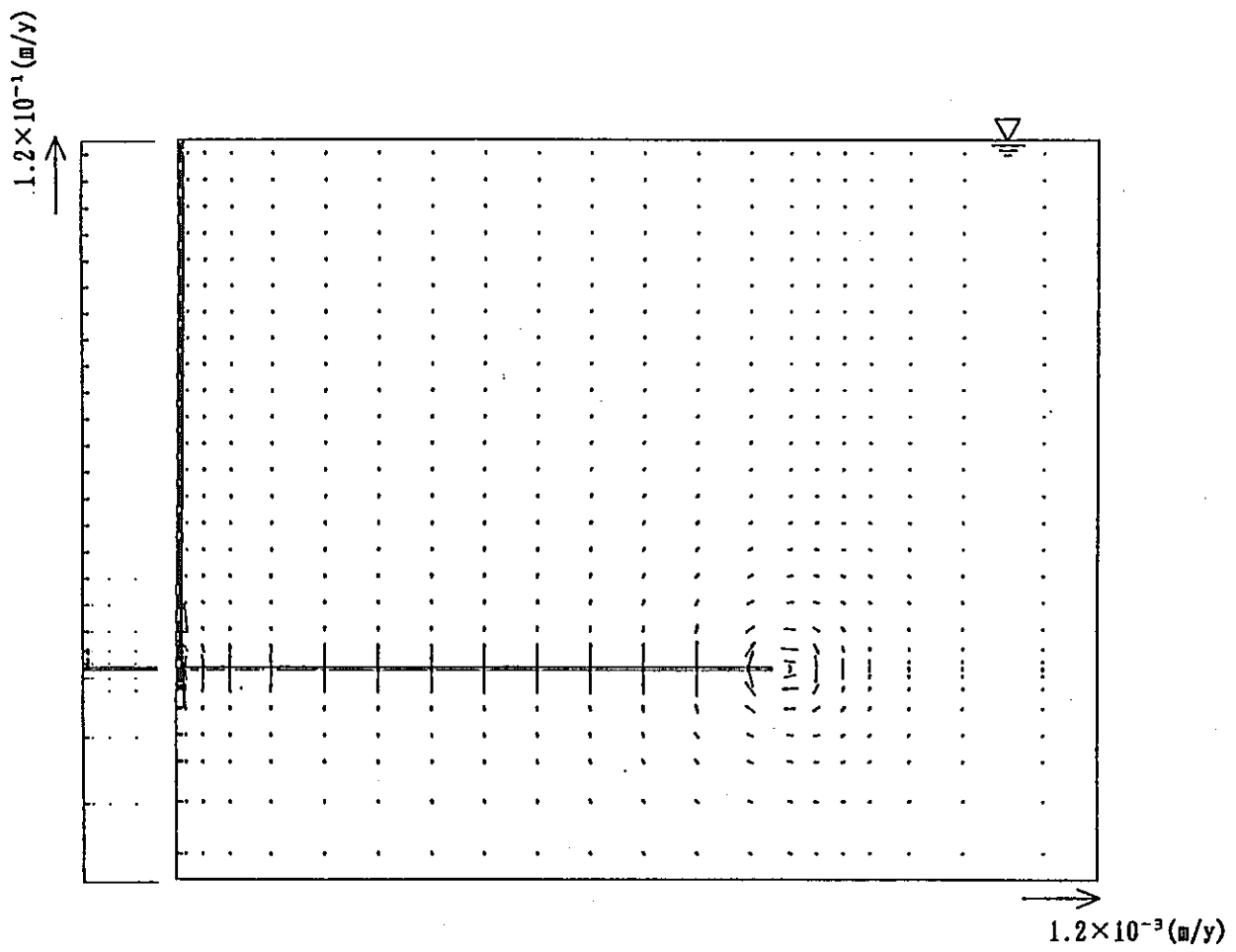


図3.4-2 流速ベクトル図(10年後)

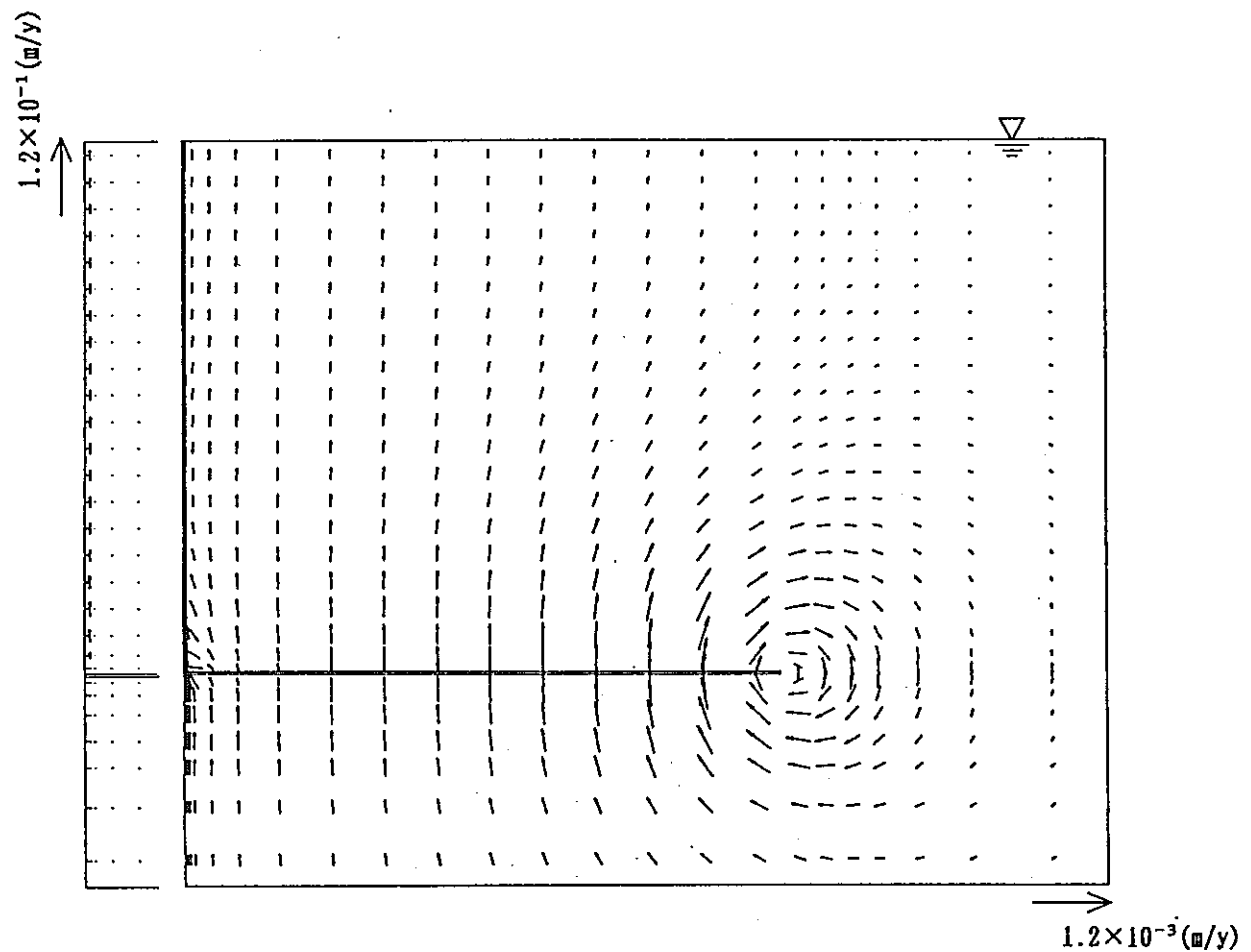


図3.4-3 流速ベクトル図(100年後)

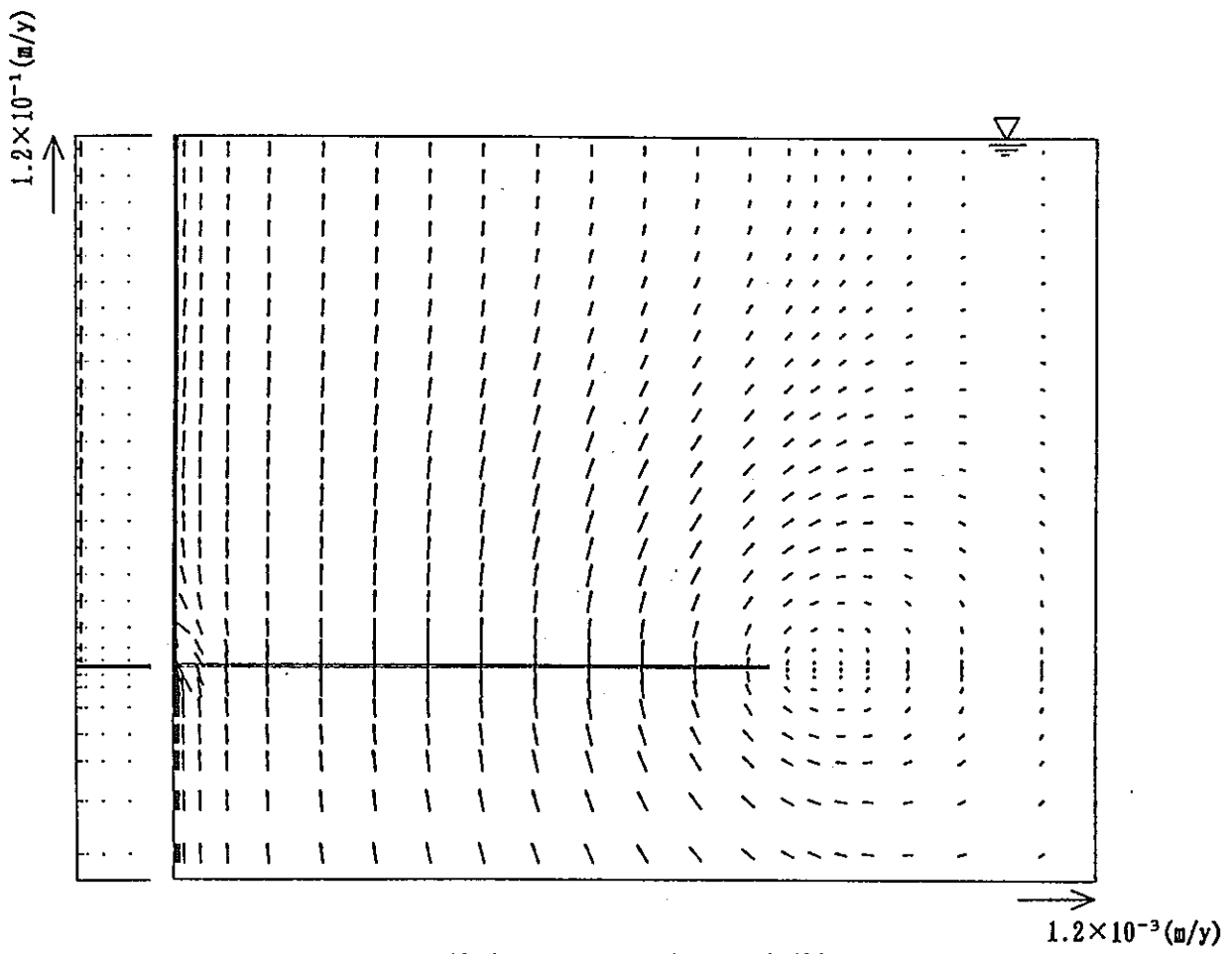


図 3.4 - 4 流速ベクトル図 (1,000 年後)

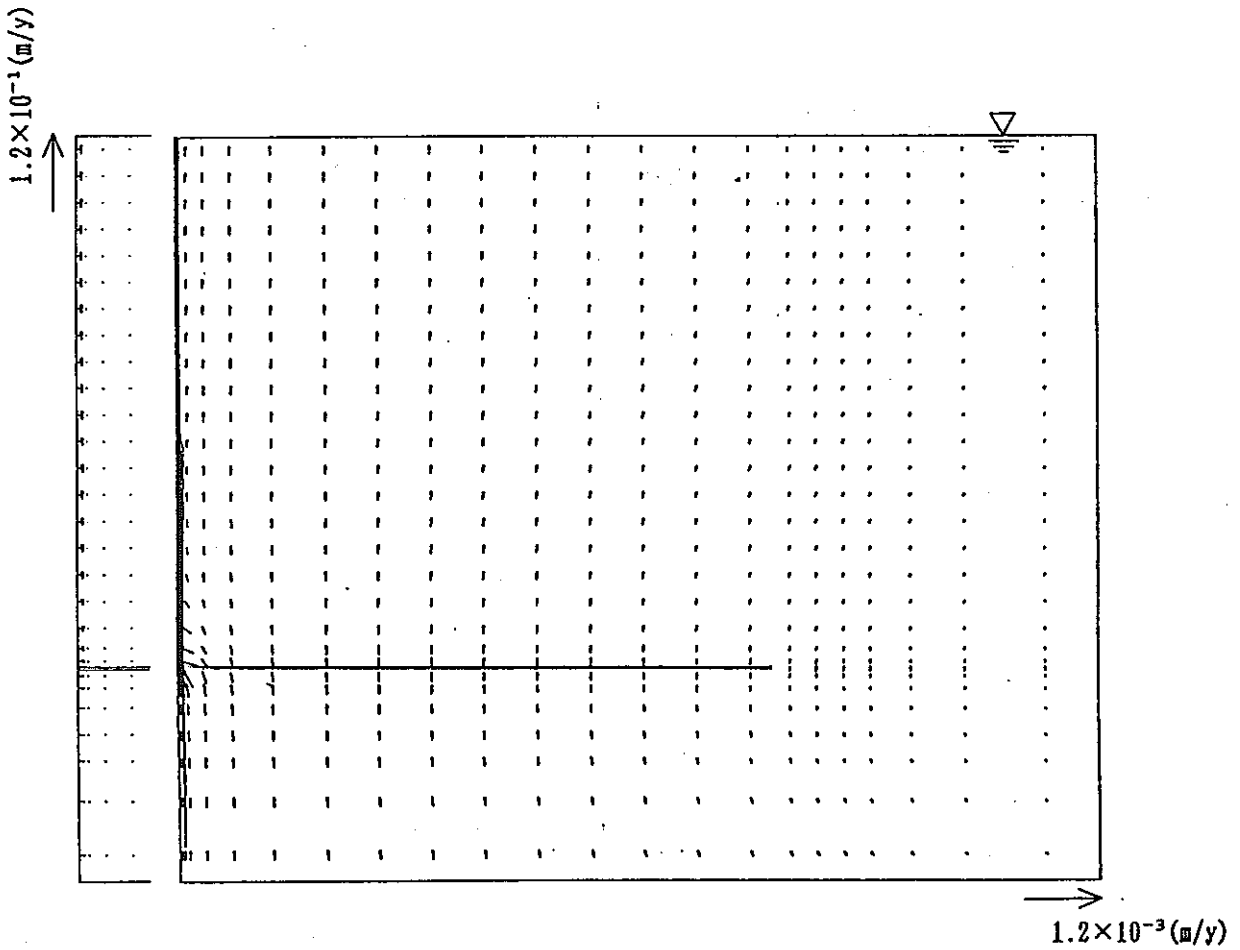
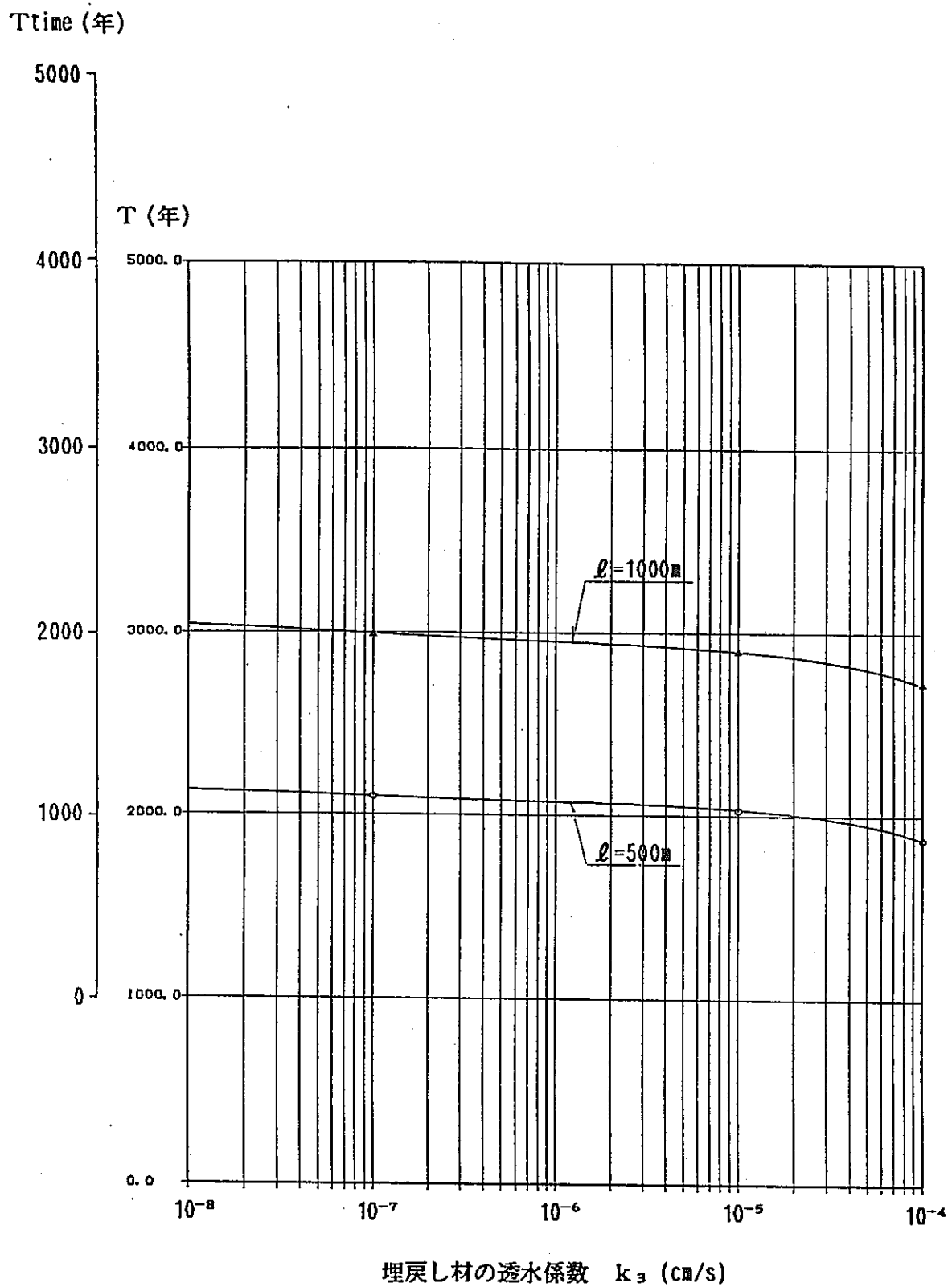


図 3.4 - 5 流速ベクトル図 (10,000 年後)



Ttime: 水粒子が処分場から l 移動するまでの所要年数 (トラベルタイム)
 T : l 移動したときの処分後の通算年数 ($T = t_0 + T_{time}$, $t_0 = 1000$ 年)

図3.4-6 埋め戻し材の透水係数と水粒子の移動時間の関係

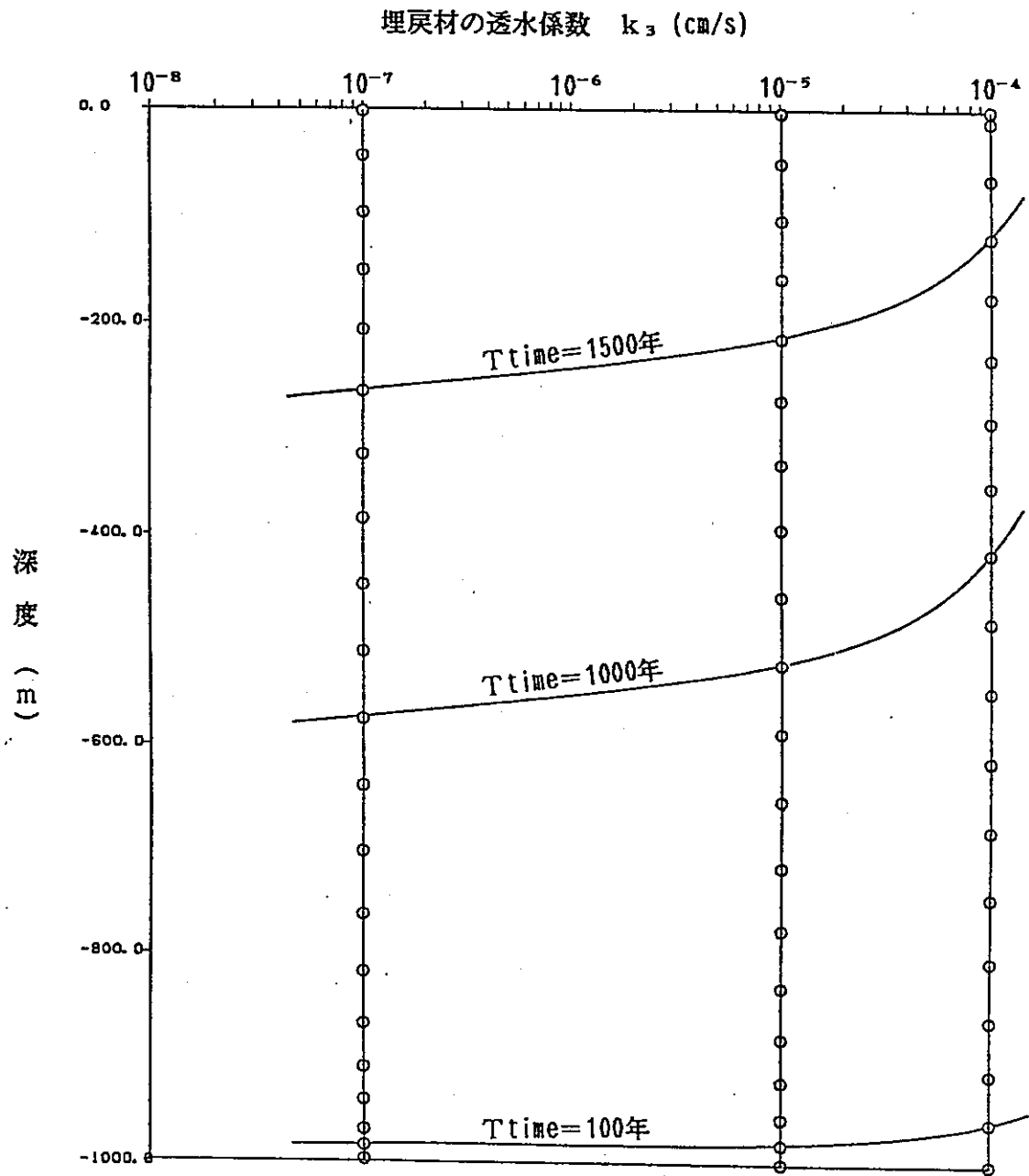


図3.4-7 埋め戻し材の透水係数と水粒子の移動距離の関係

4. プラグ

4. プラグ

4.1 材料

プラグについてはその利用によって力学的構造材と止水材とに大別でき、前者はコンクリート、現地発生材、後者は圧縮ベントナイトの使用が考えられている。

このうち、粘土系材料については「3.埋め戻し」の項で述べてあるので、ここではセメント系材料について一般的特徴を概略的に述べる。

また一つの可能性としてアスファルト系材料に係わる試験結果等について以下に示す。

4.1.1 候補材料

(1) セメント系材料

無機質接合材料としてのセメントの出現は古代エジプト時代まで遡るが、今日、セメント系材料として用いられているのは表4.1-1に示すように分類される。

通常多く用いられるセメントとしては総生産量の80%以上を占める普通ポルトランドセメントが多く、そのポルトランドセメントの化学成分は一般的に表4.1-2に示される通りである。

表4.1-1 セメントの分類

気硬性セメント	(1) 消石灰, ドロマイト, プラスター (2) 焼石膏, キーンズセメント (3) マグネシアセメント
水硬性セメント	(1) 水硬性石灰 (2) ローマン・セメント (3) 天然セメント (4) ポルトランドセメント ①普通ポルトランドセメント, ②中庸熱ポルトランドセメント ③早強ポルトランドセメント, ④超早強ポルトランドセメント ⑤低熱ポルトランドセメント, ⑥耐硫酸塩ポルトランドセメント ⑦高酸化鉄型ポルトランドセメント, ⑧白色ポルトランドセメント
混合セメント	(1) 高炉セメント (2) シリカセメント (3) フライアッシュセメント (4) メーソンリーセメント (5) 膨張性セメント (6) 着色セメント
特殊セメント	(1) アルミナセメント (2) 超速硬セメント (3) 油井セメント (4) グラウト用セメント (5) ソイルセメント (6) 有害物質固化処理用セメント (7) 高硫酸塩スラグセメント (8) オートクレープ養生用セメント (9) 耐酸セメント (10) 歯牙用セメント (11) 各種水ガラスセメント

表4.1-2 ポルトランドセメントの化学成分

セメントの種類	化 学 成 分 (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通 ポルトランドセメント	21.4 ~22.6	4.6 ~ 5.7	2.5 ~ 3.3	63.0 ~64.7	0.8 ~ 2.7	1.7 ~ 2.4
早強 ポルトランドセメント	20.0 ~21.3	4.0 ~ 4.8	2.5 ~ 2.8	64.0 ~65.7	0.7 ~ 2.5	2.3 ~ 3.3
中庸熱 ポルトランドセメント	23.0 ~23.6	3.8 ~ 4.2	3.5 ~ 4.1	62.8 ~63.6	1.0 ~ 1.4	1.9 ~ 2.1
耐硫酸塩 ポルトランドセメント	22.0 ~23.0	3.0 ~ 3.7	4.0 ~ 4.8	64.2 ~65.0	0.8 ~ 1.4	1.4 ~ 1.9

各ポルトランドセメントの性質は次のようにまとめることができる。

- 普通ポルトランドセメントは他のセメントに比べて中庸的な特性を有しているが無機質セメントと共通的な欠点も中程度に持っている。従って、乾燥収縮によるひび割れの危険性、止水性、化学抵抗性に乏しいこと、中性化を伴うことなどが指摘されている。
- 早強ポルトランドセメントは、C₃S（珪酸三カルシウム）の含有量が多く、セメントゲルが早期にかつ多量に生成されるため密実性が良く、普通ポルトランドセメントに比べて乾燥収縮が小さく、曲げ強度が強い。しかし、水和熱が大きくマスコンクリートには不向きであり、水和によって生じるCa(OH)₂が多いため化学抵抗性は期待できない。
- 中庸熱ポルトランドセメントは、C₃A（アルミン酸カルシウム）とC₃Sが少なく、水和熱の発生が少ない。また、C₃Aが少ないため化学抵抗性が強く、膨張、収縮ともに小さいので水工用に適し、高温施工に耐える。但し、短期強度は弱い。
- 耐硫酸塩ポルトランドセメントは、特別な化学抵抗性をもたせたセメントであるため、油井セメントなどに応用される。

以上、各種ポルトランドセメントの特性を述べたが、これ以外に混合セメント、特殊セメント等があり、各々の用途に応じた特性を有している。

また、セメント系材料の長期健全性の問題について、AtkinsonとHearne¹⁶⁾はセメント材料特性に影響を及ぼすいくつかの要因について以下のような事項について述べている。

- ①セメントが安定した状態へと内部の微細構造が連続して変化する。それは、アモルファス材料の結晶化、骨材反応、水和反応等である。
- ②SO₄²⁻、Cl⁻及びHCO₃⁻のようなイオン種との反応あるいは溶解(リーチング)といった地下水との反応

③微小有機体の作用

(2) アスファルト系材料

天然アスファルトは、中低レベルの廃棄物の固化マトリックスにも考えられている材料である。天然に存在する物質であることから、ナチュラルアナログによる長期安定性について検討が可能である。

その特性としての概要を以下に示す。

- ①粘弾性体としての性質を有し、強度は一般に小さい
- ②熱伝導性は小さく0.12~0.15kcal/mh°C程度である
- ③透水係数は、 10^{-12} cm/s程度であり、混合材の場合には 10^{-8} cm/s以下となる
- ④微生物の影響を考慮する必要がある。
- ⑤膨潤性はないが優れた可塑性を有している。

4.1.2 材料特性

(1) ベントナイト材料特性

圧縮ベントナイトの基本特性については、「3.埋め戻し」の項と重複することから、3章を参照されたい。

圧縮ベントナイトプラグに力学的構造材としての機能を期待できない理由として、圧縮ベントナイトが吸水することにより力学的強度が低下することに起因していると考えられる。

しかしながら、再冠水、地圧、埋め戻し材の膨潤圧等の経時変化の考慮によっては、力学的構造材及び止水材両面の役割を兼ね備えたプラグとしての利用の可能性もあり得る。

(2) セメント系材料

セメント系材料のプラグ材としての利用は、力学的強度（数100kgf/cm²以上）及び透水係数（ 10^{-7} ~ 10^{-12} cm/s）から有力なプラグ材料と考えられているが、長期健全性、セメントの化学的影響等の問題がある。

(3) アスファルト系材料

1) 密度に与える混合率の影響

天然アスファルトに珪砂及び泥岩粉を混合した場合の混合率と密度の関係を図4.1-1に示す。この図から、混合率の増加に伴って密度も増加する。これは珪砂及び泥岩粉の真比重が天然アスファルトのそれより高く2.6であるためであり、また珪砂と泥岩粉との相違は、その粒度及び天然アスファルトとの親和性によるものと考えられる。⁶⁾

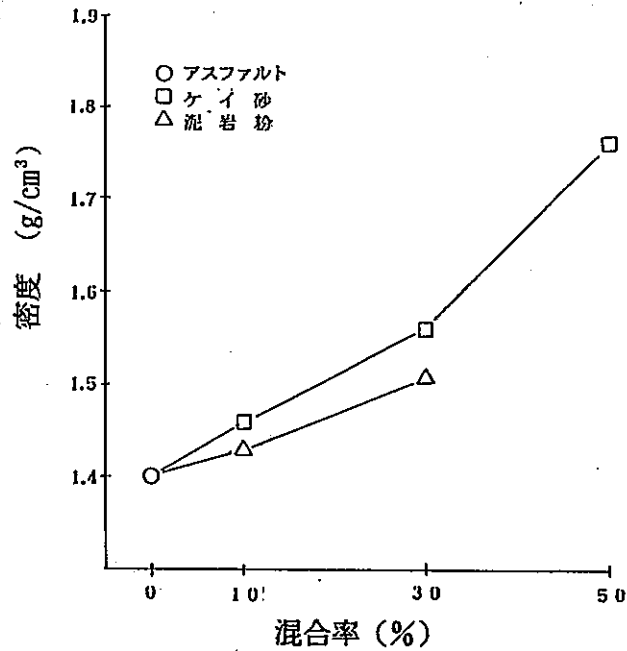


図4.1-1 試験体密度と混合率の関係

2) 力学的特性

天然アスファルトの一軸圧縮試験は、試験体が破壊しないため、圧縮歪みが15%になった時点での圧縮応力を求めてそれを代表値とした。

密度と圧縮応力の関係を混合率をパラメータに図4.1-2に示す。また、各材料の混合率と圧縮応力の関係を図4.1-3に示す。

これらの結果から、

- ①混合材の混入により圧縮応力は著しく増加
- ②複合材は、密度及び混合率の増加に伴って圧縮応力は増加
- ③珪砂よりも泥岩粉を混合したほうが圧縮強度が高い

天然アスファルトの比重が1.4 に対して複合材のそれが2.6 であるため混合によって密度は増加し、また剪断特性が改良されて圧縮強度も増加すると考えられる。⁶⁾

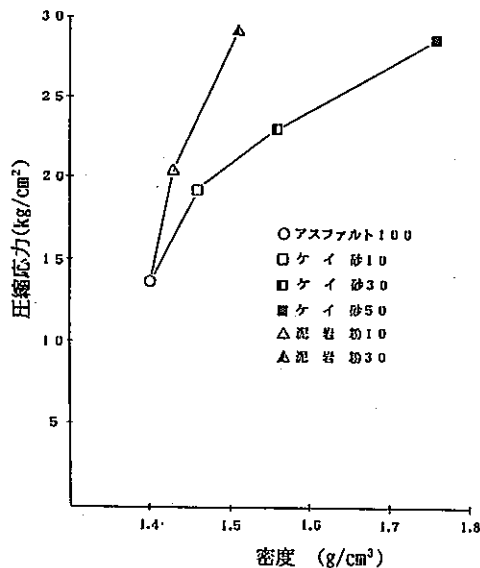


図4.1-2 試験体密度と圧縮歪み15%時の圧縮応力の関係

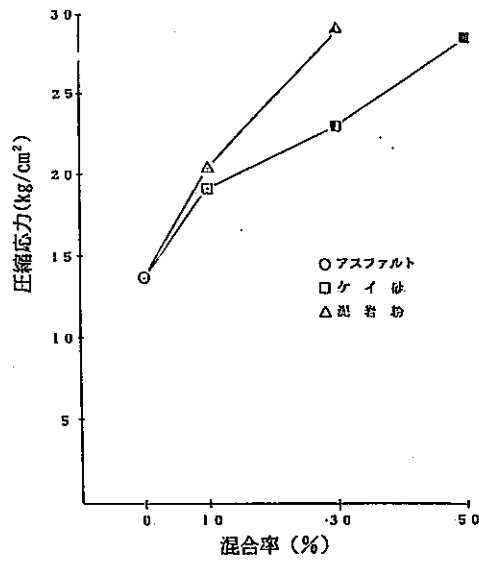


図4.1-3 混合率と圧縮歪み15%時の圧縮応力の関係

3) 熱伝導率

試験温度が50°C以上では溶融するため、試験は20°Cと30°Cで行った結果(図4.1-4)、

- ①混合率及び密度の増加に対して熱伝導率は急激に増加する傾向を示す。
- ②密度に対しては泥岩粉の方が増加傾向が大きい
- ③20°Cと30°Cでの相違はほとんどない

等が明らかとなった。⁶⁾

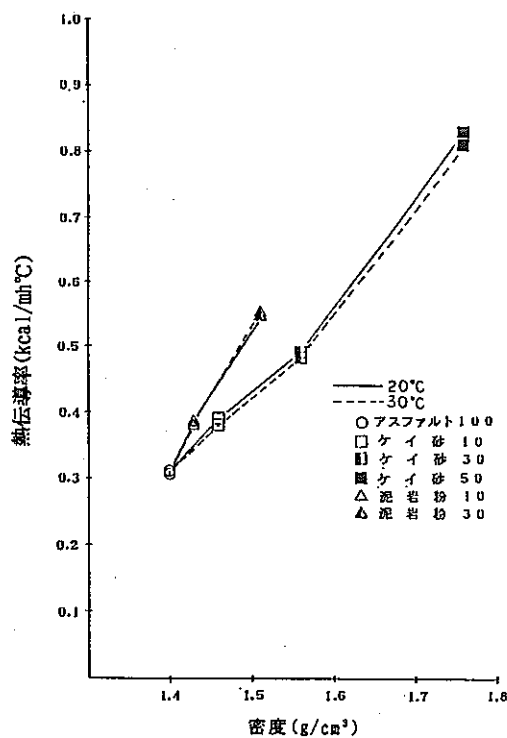


図4.1-4 試験体密度と熱伝導率の関係

4.2 基本仕様

4.2.1 前提条件

「3.2.1」の項を参照

4.2.2 プラグ仕様

プラグは埋め戻された坑道及び立坑に設けられ、坑道もしくはその周辺の岩盤中を移行する地下水、放射性廃棄物から漏出した核種の移行経路を長期にわたって遮断する機能を有するように設置されるものである。プラグはこれらの目的を満足するように基本仕様が定められる。プラグの設置場所としては、基本的に処分場のシーリング機能に係わる重要箇所を設置されることになる。すなわち、①機能の異なる坑道交差部、②地層の攪乱、規模の大きな割れ目の存在する箇所などである。また形状についても、遮水機能が主な設置の目的の場合には、材料特性を活かす形状が選択され、支持機能を求める場合には、くさび状のプラグ形状が有利になる。周辺岩盤の緩み領域を経路とする地下水経路の遮断には、基本的には緩み領域を除去するように岩盤に切り込みをいれ、透水性の小さいプラグ材料の設置が可能な形状が求められる。

(1) 処分坑道

処分坑道は、両端を主要坑道に接するため、①処分坑道内埋め戻し材料の主要坑道への膨潤防止、②処分坑道と主要坑道の水理的バリアとして主要坑道に対して両端でプラグを設置する。プラグ材料としては、支持機能を第一に考慮し、ここではコンクリート材料を使用することとして検討を行った。

プラグの厚さは次式で与えられる。

$$L \geq \frac{F_s \cdot P \cdot A}{\tau_a \cdot \ell}$$

L ; プラグ厚(m)
 F_s ; 安全率 ($F_s \geq 2$)
 P ; プラグに作用する圧力(tf/m²)
 A ; プラグの断面積(m²)
 τ_a ; 許容剪断応力(tf/m²)
 ℓ ; プラグの周長(m)

プラグの厚さは鉾山で用いられているプラグコンクリートの設計式を目安に埋め戻し材の膨潤圧(1Mp)と地山の強度(結晶質岩の許容剪断応力; 4Mp、堆積岩の許容剪断応力; 1Mp)の関係、安全率(=2)を考慮して求め以下のように設定した。

対 象 坑 道	プ ラ グ 厚 さ
結晶質岩(処分孔縦置き方式), 埋め戻し材対象	$L \geq 2.5m \Rightarrow 4m$
結晶質岩(坑道横置き方式), 緩衝材対象	$L \geq 15.0m \Rightarrow 15m$
堆積岩(坑道横置き方式), 緩衝材対象	$L \geq 15.0m \Rightarrow 15m$

プラグの形状は、プラグにかかる荷重を周囲の岩盤に確実に伝達するとともに周辺の緩み域の処理を考慮してプラグ設置位置の支保及び覆工を除去するとともに周囲の岩盤に切り込みをいれ周囲を1m拡幅した形状とする。図4.2-1に処分坑道プラグの構造を示す。³¹⁾

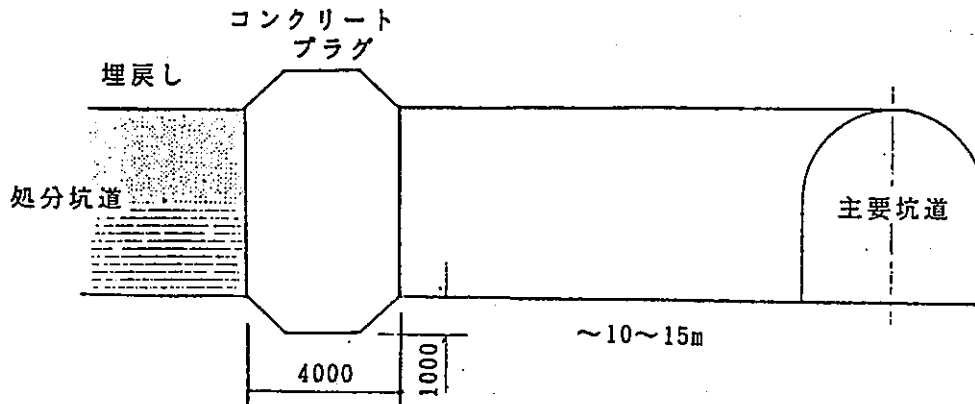


図4.2-1 処分坑道プラグ仕様

(2) 主要坑道・連絡坑道

主要坑道及び連絡坑道のプラグ仕様は、図4.2-2に示すように埋め戻し材の膨潤を抑えるコンクリート製のプラグと坑道内・緩み域を流れる地下水を遮断する水理バリアとして機能するベントナイトブロック部とを組み合わせた構造とする。設置範囲は、支保、覆工は撤去するとともにコンクリートプラグ部とベントナイトブロック部は周囲の岩盤を掘削して1m程度拡幅し、緩み域を除去して設置する。また、コンクリートプラグ部とベントナイトブロック部の間にはベントナイトブロック部の膨潤を直接コンクリートプラグにかからないようにするためと両者の剛性の違いによる間隙発生防止のためにベントナイト吹き込みによる埋め戻し部3mを設ける。このプラグ仕様は、結晶質岩と堆積岩共通の仕様とする。

³¹⁾

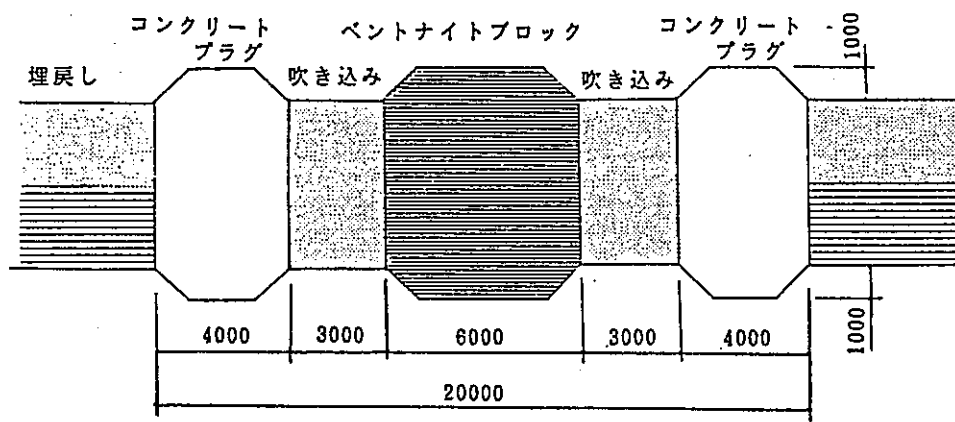


図4.2-2 主要坑道・連絡坑道のプラグ仕様

(3) アクセス坑道

立坑のプラグ構造は、主要坑道・連絡坑道の構造と同様であるが、縦に埋め戻されることから主要坑道と以下の点で仕様が異なる。

- ①プラグ上部の埋め戻し材の荷重が直接かかった場合を仮定して必要コンクリート厚さを6 mに設定した。
- ②プラグで仕切られた埋め戻し材が長期にわたって沈下しても間隙が生じないように、膨潤度の高いベントナイトブロックを設置する。

設定した立坑のシーリング仕様を図4.2-3に示す。

このシーリング構造は、基本的に200m間隔で設置するものとし、必要に応じて地質的に乱されている区間や地層の境界部、透水性の高い部分において設置が考慮される。³¹⁾

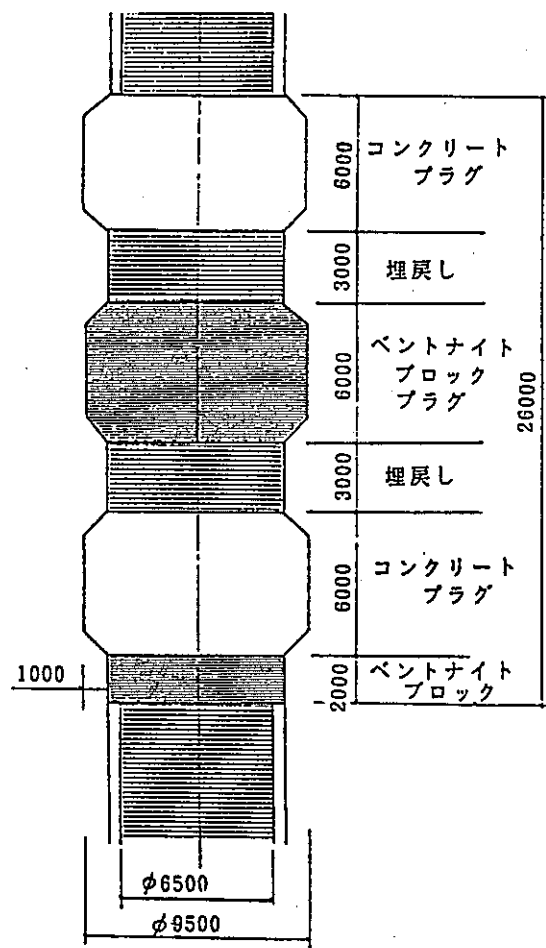


図4.2-3 立坑のプラグ仕様

(4) 全体プラグ配置

処分場全体のシーリングのために基本的に設置されるプラグ位置を図4.2-4に示す。

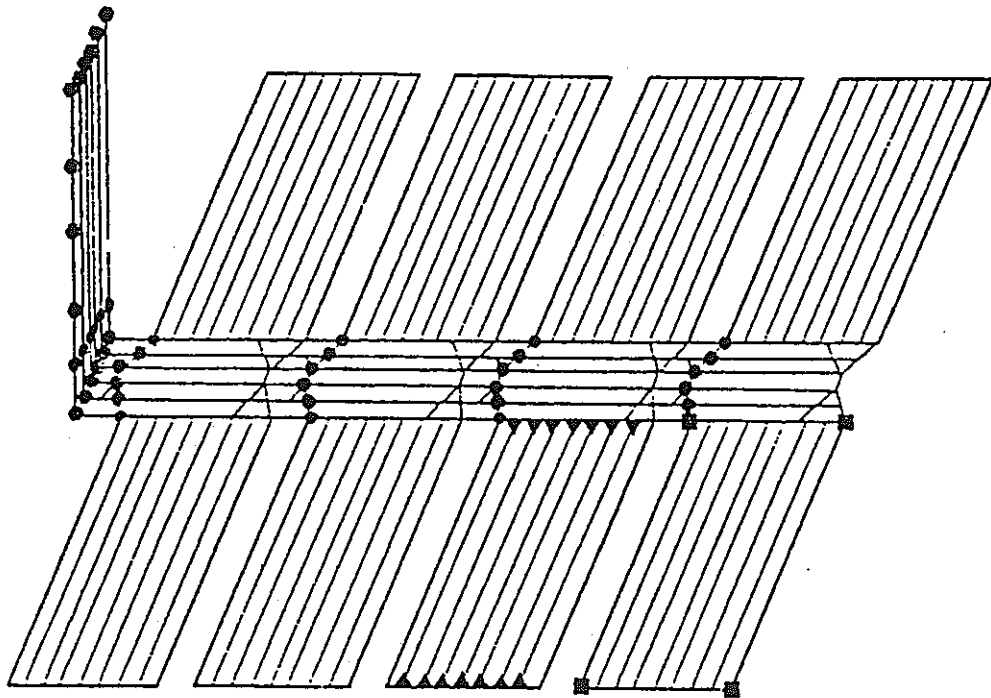


図4.2-4 処分場プラグ基本配置図

(5) ボアホールのプラグ

地層処分場の候補地選定や処分場設計に際しては、地表から深部岩盤についてかなりの情報を得る必要からボーリング調査が広範にまた大量に実施されることになり、そのままボアホールを放置することは将来的に地下と地表を結ぶ地下水の通り道になる可能性を残すことから、シーリングの必要がある。そのため、充填物が確実にボアホールと一体化し、長期にわたって柔軟な構造を保ち止水性を持続するように材料、施工方法を選定することが、ボアホールシーリング仕様の決定に際して求められる。諸外国の研究で最も進んでいるストリパの研究成果として、円筒状のベントナイトペレットを銅製の多孔チューブに入れ、ボアホール内に挿入し、ベントナイトの膨潤によって試錐孔をシーリングする方法があり、湿潤後の密度が $1.7 \sim 2.0 \text{ t/m}^3$ の均質となり、 $14 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ の水圧に耐えることが実験的に確認されている。¹²⁾

基本的には同様なシーリング方法、材料によってボアホールのシーリングが可能と考えられる。図4.2-5にその仕様を示す。³¹⁾

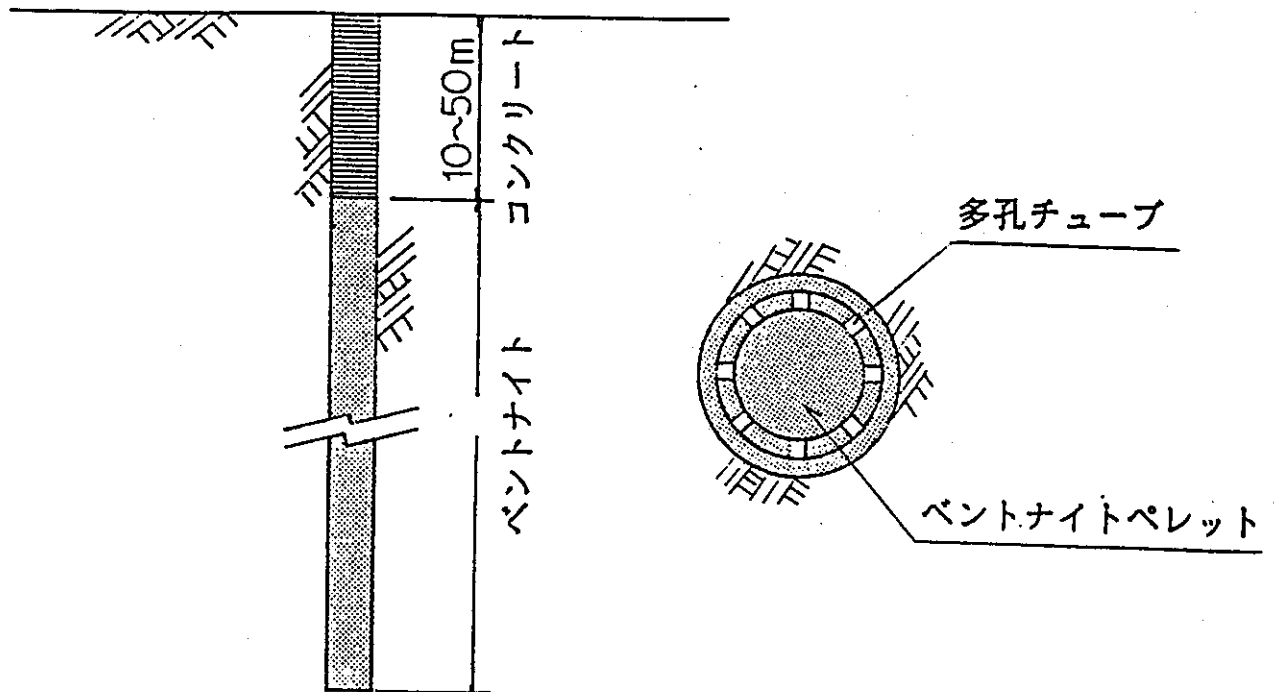


図4.2-5 ボアホール閉鎖仕様

4.3 施工

ここでは、「4.2 基本仕様」で述べたプラグ仕様及び前提条件を基にその施工計画を示すものである。

4.3.1 基本的手順

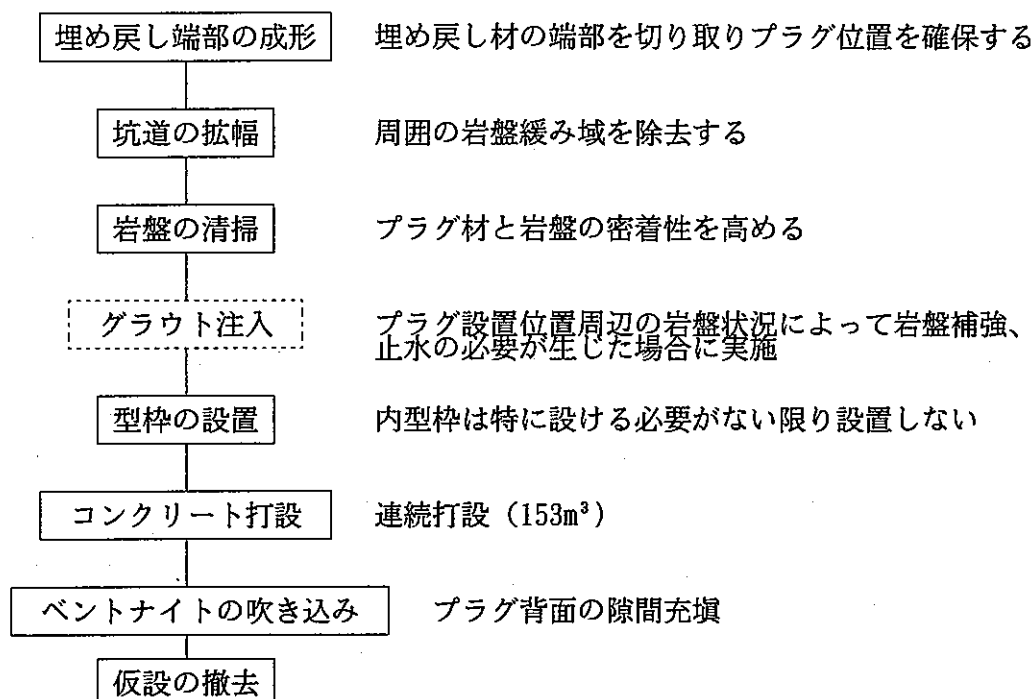
「3.2.1」の項を参照

4.3.2 処分坑道のプラグ

(1) 結晶質岩

1) 処分孔縦置き方式

処分坑道の埋め戻し完了後、坑道の両端にコンクリート性のプラグを設置する。プラグ設置の作業フローを以下に示す。



プラグ設置位置の拡幅に関しては、岩盤をできる限り緩めずに掘削する必要がある。プラグ背面の岩盤に亀裂が存在すると引張り応力や地下水の影響を受けて亀裂が拡大する恐れがあり、プラグの岩盤切り込み部を迂回して地下水のフローパスを形成するとともにプラグの安定性に影響を与えることになる。

掘削方法としては、爆薬を使わずに岩盤を切削する必要がある。無発破工法としては、静的破碎工法や連続スリット削孔によるラインカット工法等が代表的であるが、今回の計画では掘削面が平滑に仕上げられる利点を有するラインカット工法によって岩盤を切り取り、必要な領域まで拡幅する工法を適用することとした。³¹⁾

プラグの施工概念を図4.3-1に、サイクルタイムを表4.3-1に処分坑道1本当たりの所要工期を表4.3-2に示す。

表4.3-1 プラグ設置サイクルタイム

	時間 (日)	備 考
①準備 (埋め戻し端部処理)	1	
②坑道拡張掘削	6	64m ³ /0.55m ³ /h ⇒ 5.8日
③岩盤清掃 (注入) 型枠設置	2	
④コンクリート打設・ベント ナイト吹き込み	2	コンクリート153m ³
⑤撤去	1	
計	12	

表4.3-2 処分坑道1本 (1,200m) の埋め戻し閉鎖所要工期

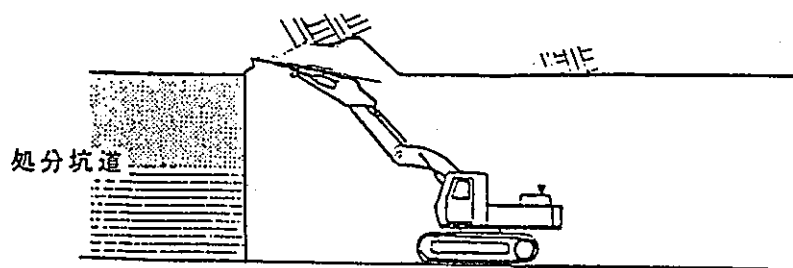
工 期	所 要 工 期	
①締め固め	(12h/100m × 1200m × 1.15) ⇒ 9日	15cm×17層
②吹き込み	(98h/100m × 1200m × 1.15) ⇒ 68日	
③プラグ設置	⇒ 12日	2ヶ所同時
計	89日	

2) 坑道横置き方式

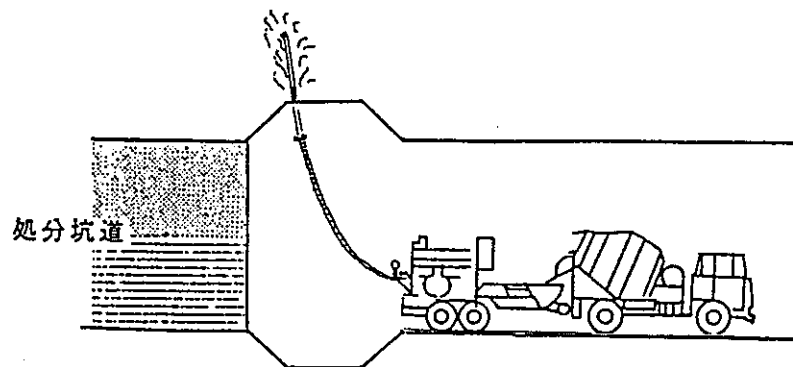
坑道横置き方式の場合は、廃棄体の設置に伴って緩衝材が処分坑道内に設置されていくことから、閉鎖の作業手順としては処分坑道の両端にプラグを設置することが閉鎖作業の全てとなる。作業フロー及び施工方法は処分孔縦置き方式の場合と同様のものとなる。

プラグ仕様が緩衝材を対象とした設計となることから、厚さ15mのプラグ設置となるため、所要工期は処分孔縦置き方式に比べて延びることになる。以下にサイクルタイムを示す。³¹⁾

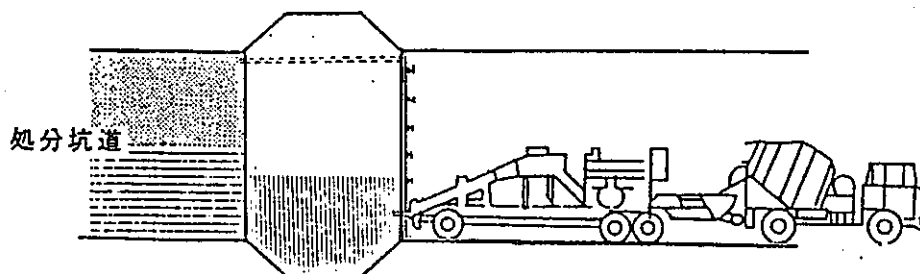
坑道の拡幅



グラウト注入



コンクリート打設



ベントナイトの吹き込み

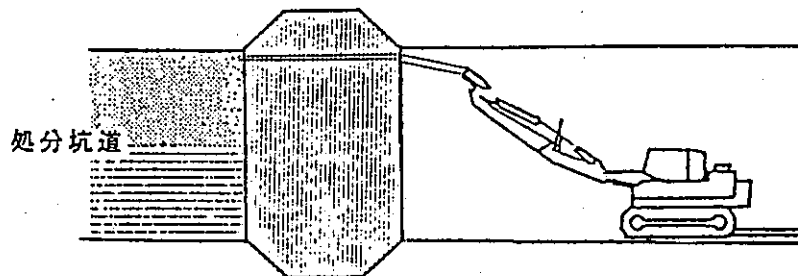


図4.3-1 プラグ設置の施工概念

プラグ設置サイクルタイム

	時間（日）	備 考
①準備（埋め戻し端部処理）	1	176m ³ /0.55m ³ /h×2台⇒5.8日
②坑道拡張掘削	8	
③岩盤清掃（注入） 型枠設置	3	
④コンクリート打設・ベント ナイト吹き込み	2	コンクリート282m ³
⑤撤去	1	
計	15	

所要工期としては、両端のプラグを同時に施工することから処分坑道に係る閉鎖工期は15日となる。しかしながら、坑道が3mの円形断面で、掘削はTBMを使用することになるため周辺岩盤の緩み域の発生は発破工法に比べて少ないことが予想され、拡張部の縮小、グラウト注入の減少が図られ、工期的に短縮される可能性もある。³¹⁾

(2) 堆積岩

1) 坑道横置き方式

結晶質岩における坑道横置き方式と同様にプラグ設置作業だけが、処分坑道の閉鎖作業となる。閉鎖に関する仕様、削孔手順及びサイクルタイムは、結晶質岩の処分坑道タイプと同様である。

4.3.3 主要坑道のプラグ

主要坑道は1パネル分の処分坑道を閉鎖した後に作業を行うことになり、切羽面が少ないこともあって工程的な調整は埋め戻し、プラグの施工能力が直接的に影響してくる。

主要坑道に設置されるプラグは、坑道に沿った水みちを遮断するとともに埋め戻し材の膨潤を抑制するためのもので、図4.3-2に示したように施工される。

主要坑道のプラグ設置作業手順は、処分坑道のプラグ手順と基本的には変わらないが、コンクリートプラグの間にベントナイトブロックのプラグを設置する作業が加わってくる。プラグ設置作業フローを図4.3-3に示す。

ベントナイトブロックの積み上げ方法は、基本的に坑道横置き方式の緩衝材の設置方法と同様の工法とする。ブロックは、0.6m×1.0m×1.0mを基準形とし、圧縮成形密度2.0kg/cm²として1ブロック1.2tの製品を積み上げてプラグを形成することとした。各方式でのプラグ所要工期を表4.3-3に示す。³¹⁾

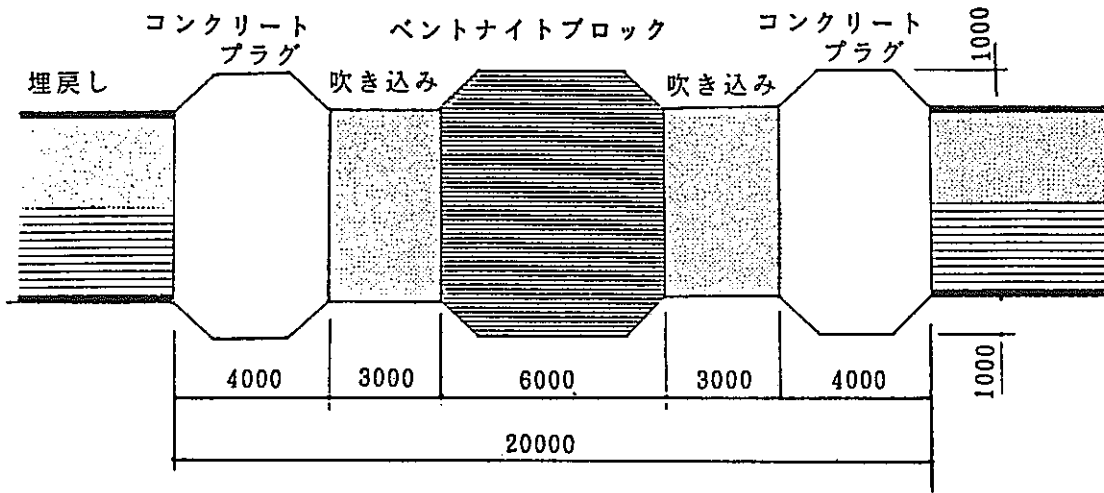


図4.5.3-1 主要坑道・連絡坑道のプラグ仕様

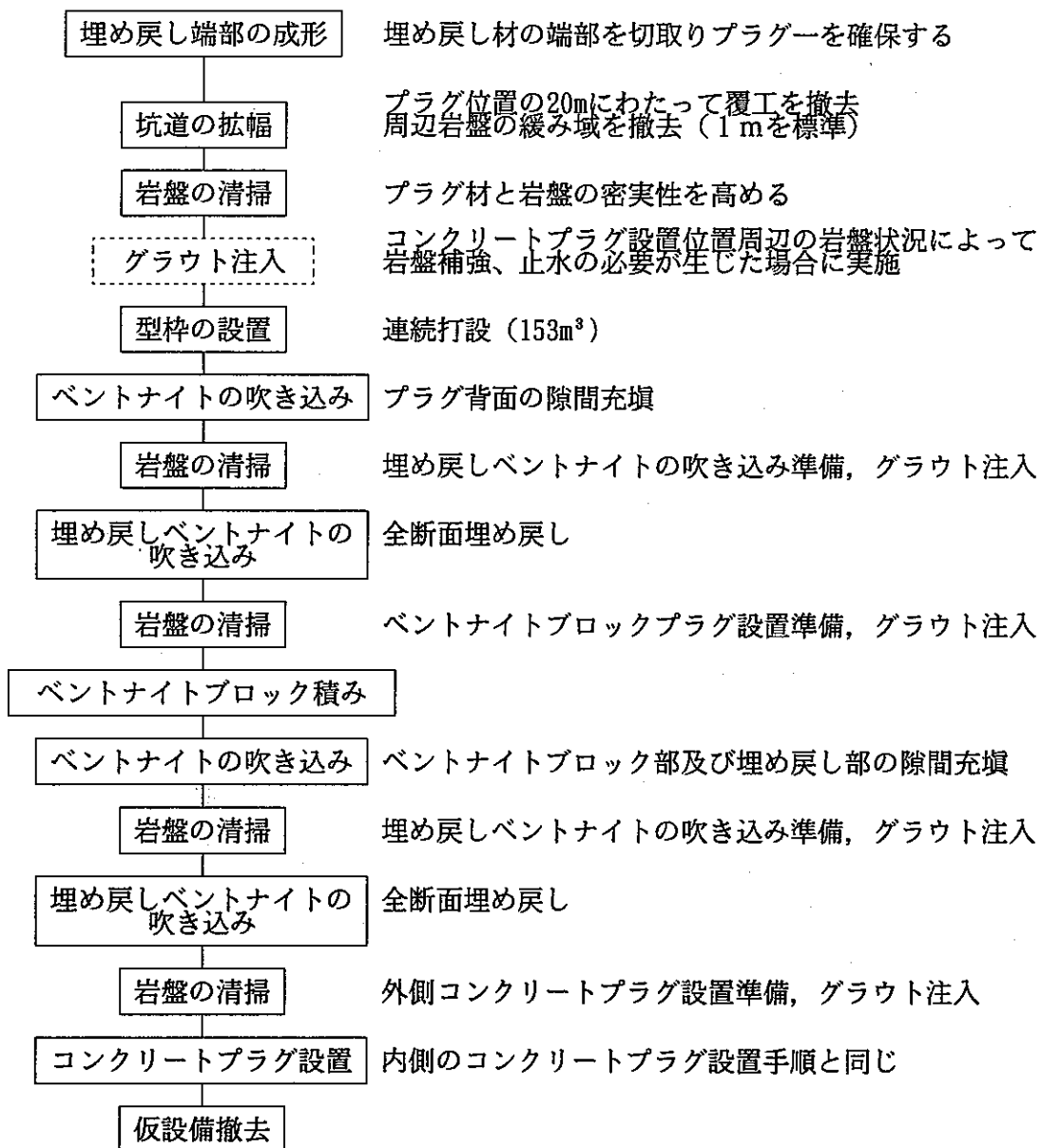
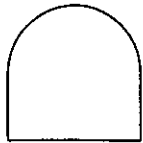
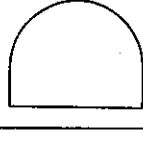
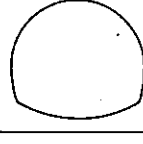


図4.3-3 プラグ設置作業フロー

表 4.3-3 主要坑道閉鎖プラグ設置所要工期

形式	断面	工種	所要工期 (1プラグ当たり)
結晶質岩		①準備・撤去 ②坑道拡幅掘削 ③岩盤清掃・注入 ④コンクリート打設 ⑤ブロック積み ⑥埋戻し吹き込み	1 + 1 = 2日 25日 1 × 5回 = 5日 2 × 2回 = 4日 2日 1 × 2回 = 2日
		計	40日
		①準備・撤去 ②坑道拡幅掘削 ③岩盤清掃・注入 ④コンクリート打設 ⑤ブロック積み ⑥埋戻し吹き込み	1 + 1 = 2日 24日 1 × 5回 = 5日 2 × 2回 = 4日 2日 1 × 2回 = 2日
計		39日	
堆積岩		①準備・撤去 ②坑道拡幅掘削 ③岩盤清掃・注入 ④コンクリート打設 ⑤ブロック積み ⑥埋戻し吹き込み	1 + 1 = 2日 24日 1 × 5回 = 5日 2 × 2回 = 4日 2日 1 × 2回 = 2日
		計	39日

4.3.4 連絡坑道のプラグ

連絡坑道の閉鎖は、処分場全体の工程に支配され、処分場の最奥部のパネルが完全に埋め戻され、パネルへのアクセスの必要が完全になくなってから作業を開始する。閉鎖の進行は、図4.3-4に示すように4区画に分けて、他のパネルでの操業、監視、建設の進行にあわせて実施することになる。連絡坑道のプラグは、基本的に主要坑道のプラグ設置と同様の施工手順、施工方法によって施工することになる。

311

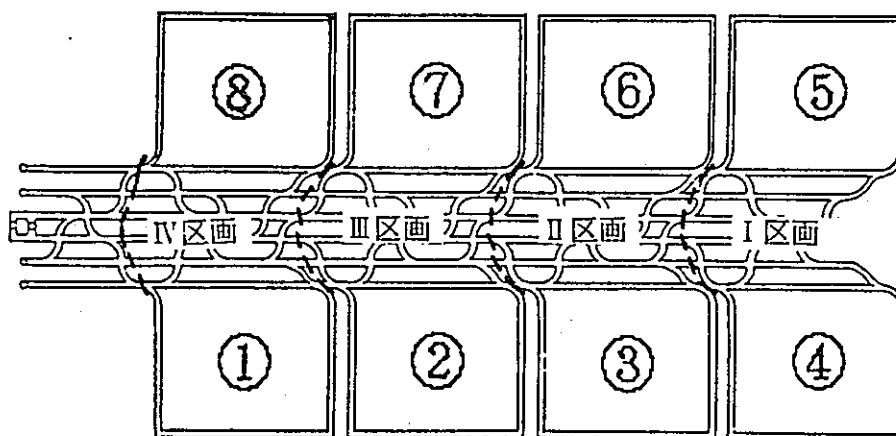


図 4.3-4 連絡坑道の閉鎖作業区画割り

4.3.5 アクセス坑道のプラグ

立坑の閉鎖は、基本的に主要坑道の埋め戻し、プラグ設置と同様の施工手順、施工法によって施工され、立坑底から順次埋め戻し、必要とされる箇所閉鎖プラグを設置しつつ坑口を最後に閉鎖し全ての閉鎖作業を終了する。

立坑のプラグは、主要坑道のプラグ構造と基本的に変わらないことから施工手順、

施工法は同様である。

プラグ設置に要する工期は、コンクリートプラグの厚さが4 mから6 mに変化すること、下段のコンクリートプラグの下にベントナイトブロックを2 mの厚さに設置することなどが、主要坑道の閉鎖プラグと異なるため工期は主要坑道の閉鎖プラグ工期に比べて若干延びることになる。立坑の閉鎖プラグ設置に要する工期は、1か所あたり48日となる。³¹⁾

4.4 機能評価

4.4.1 プラグ設置後の地下水流動

設計要因のうち水理条件、熱環境条件、掘削条件を考慮して処分場から地層処分表面に至る最短経路として予想される立坑ルート上の要素における流速の鉛直成分を用いたトラベルタイムの検討による、プラグの有無によるトラベルタイムの影響を以下に述べる

(1) 解析条件及びモデル

「3.4.2(1)」の項を参照

(2) 解析結果

プラグの有無によるトラベルタイムの影響としては、図4.4-1に示すとおり立坑の中央深度付近に母岩の緩み領域を50m 区間遮断する形で設置されている状況を想定した。プラグ部における流速ベクトル図(図4.4-2、3)によると、プラグ周辺の母岩部において水粒子が回りこんでいる状況が認められている。この回り込みを考慮した計算結果(図4.4-4)、プラグの有無による水粒子の移動時間(図4.4-5)及びその移動距離(図4.4-6)の図から、プラグ設置部分においてその効果が確実に認められる。さらに、処分場からプラグ下端までの水粒子の移動状況をみると、プラグ部に近づくにつれ次第に移動速度が遅くなってきており、緩み岩盤ルートを遮断した効果がでている。またプラグ上端から地表面までの移動状況をみてもやはりプラグがない場合に比べ移動速度は遅くなっている。これは、プラグ部を通過し終わるまでの時間的なズレにより、熱的影響が減衰してきているからであると思われる。したがって、これらのことは、岩盤の性状に応じてプラグを設置する場合は別として、プラグの設置深度にも自ずと最適な値があることを示唆していると考えられる。

このように、プラグは地下水の流動抑制として有効であるといえ、グラウトを併用することによりこの効果を一層高めることができると思われる。¹⁸⁾

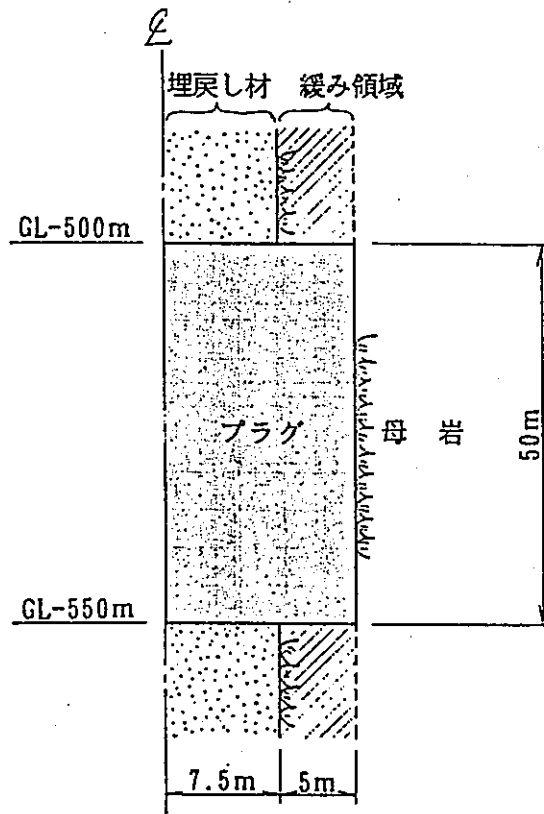
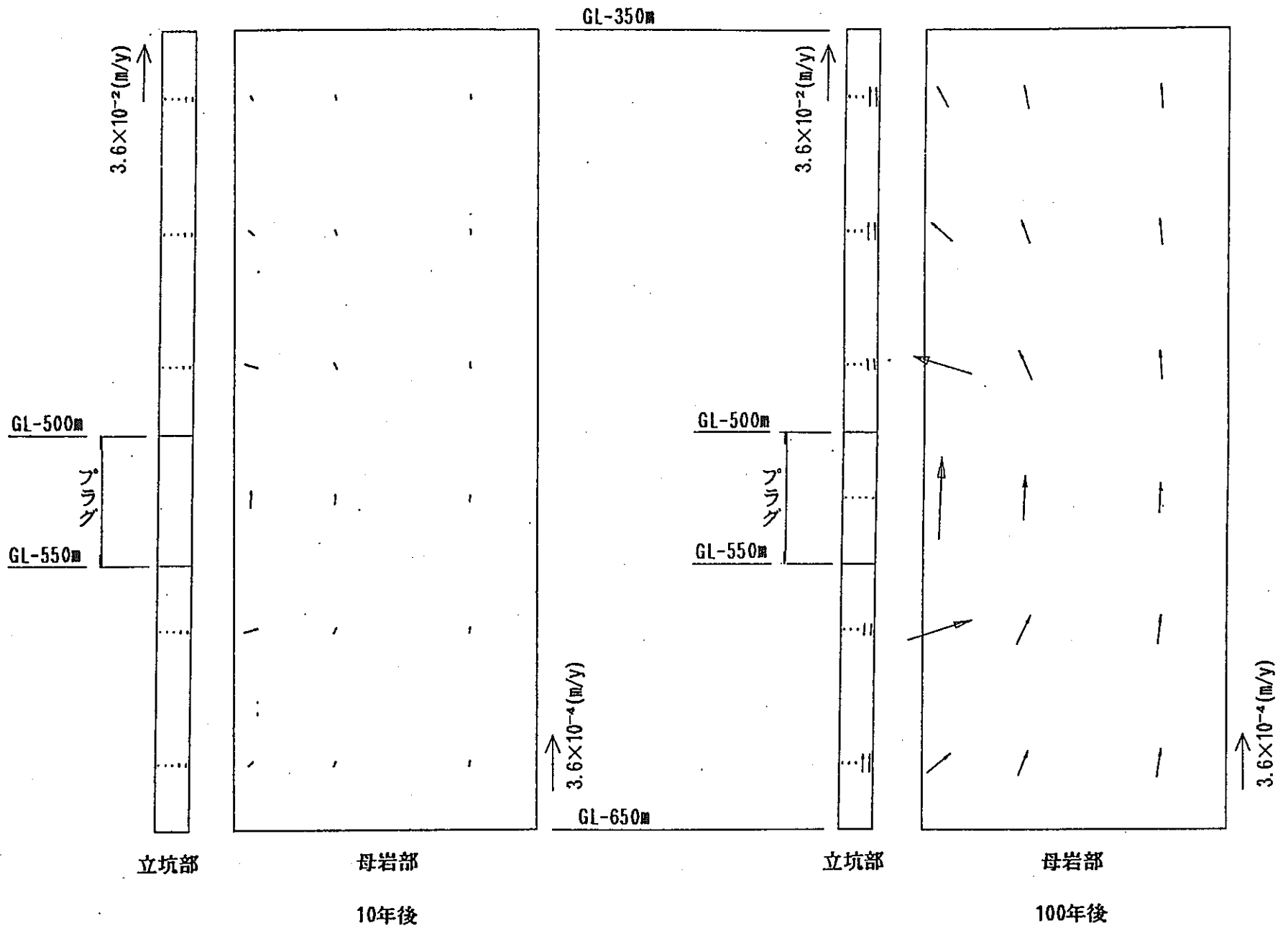


図4.4-1 プラグの設置状況



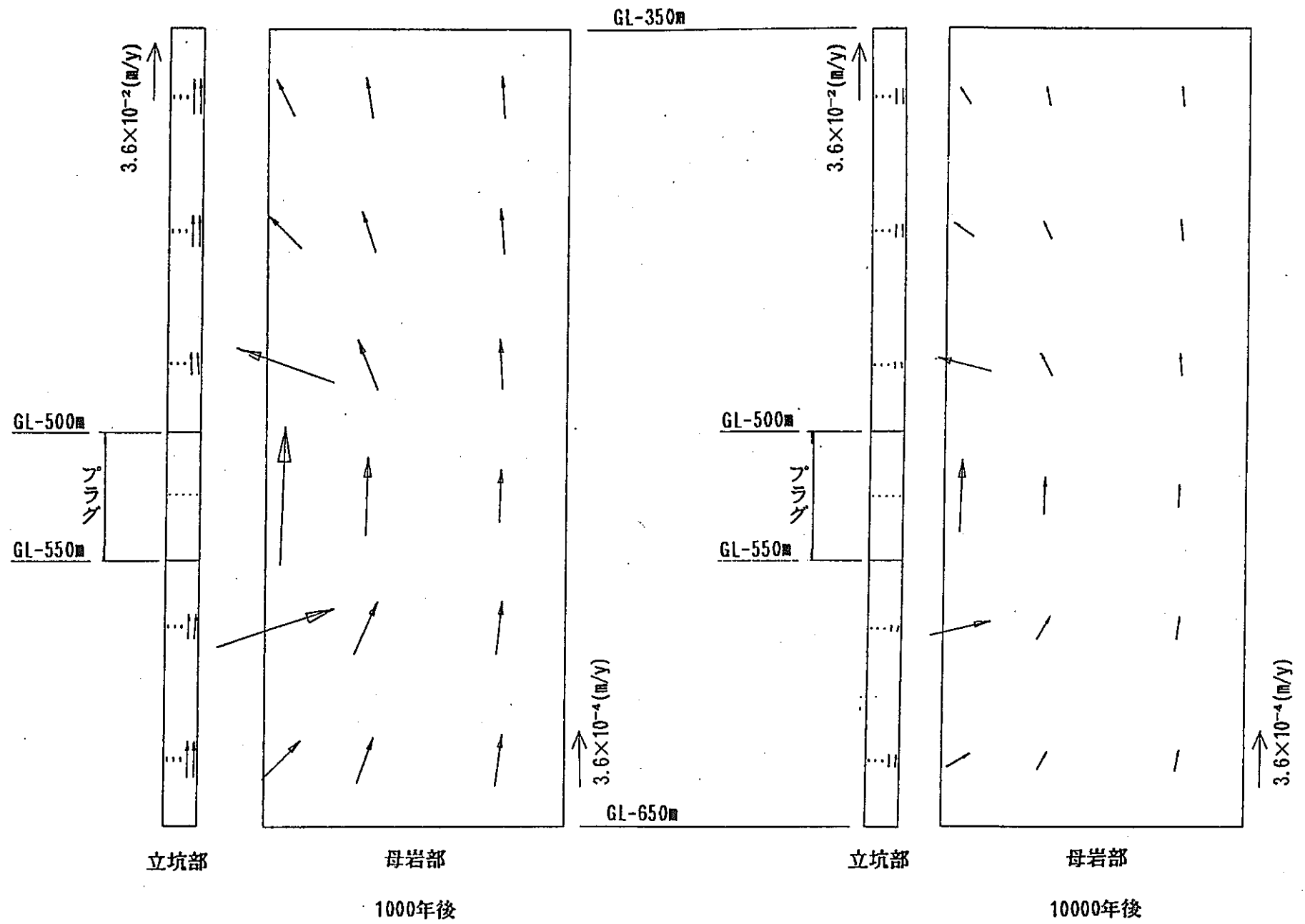
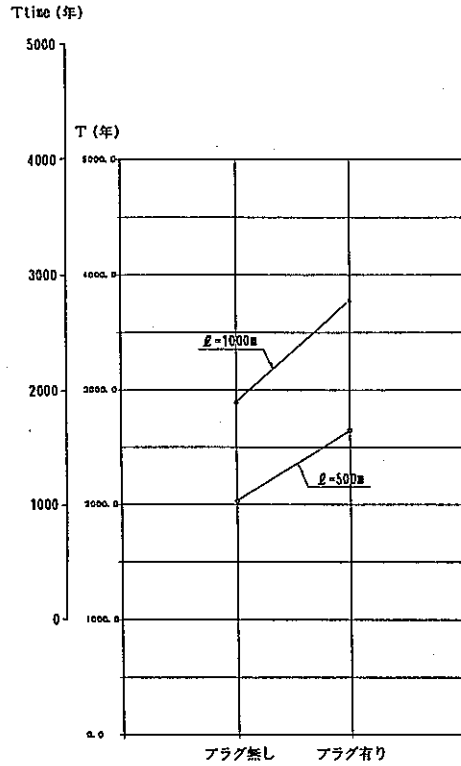


図4.4-3 プラグ周辺流速ベクトル図

GL±0m 地表面		トラベルタイムの計算 開始時刻 t_0 (年)	各区間のトラベルタイム Ttime (年)	処分後の通算年数 T (年)
埋戻し材 ↑ 緩み岩盤 ↑ 母岩	GL-500m	2650	1130	3780
	プラグ部 GL-550m	2140	510	2650
	GL-1000m	1000	1140	2140

処分場

図4.4-4 プラグ部の回りこみを考慮したトラベルタイム



Ttime: 水粒子が処分場から移動するまでの所要年数 (トラベルタイム)
 T: 移動したときの処分後の通算年数 ($T = t_0 + Ttime$, $t_0 = 1000$ 年)

図4.4-5 プラグの有無による水粒子の移動時間

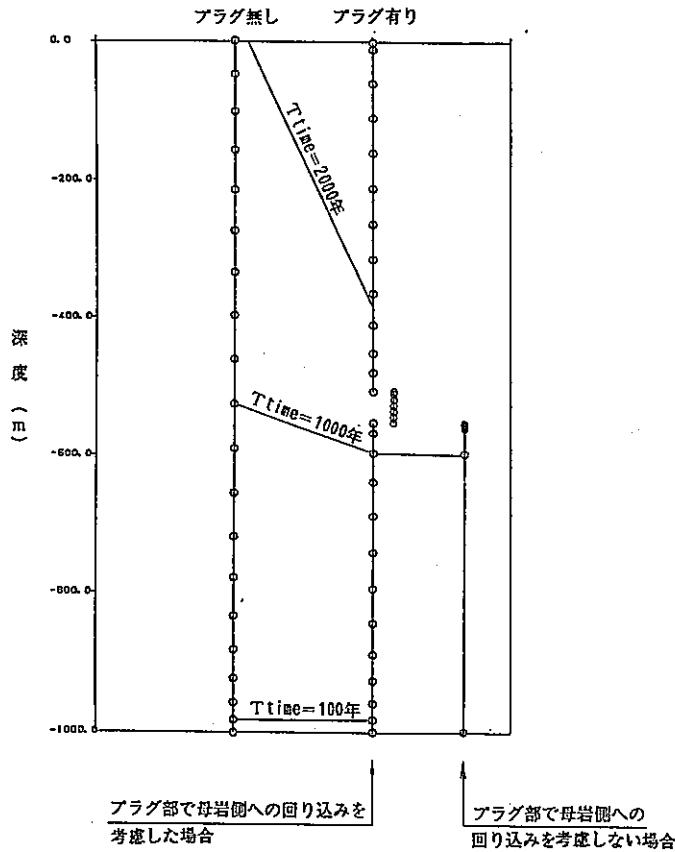


図 4.4-6 プラグの有無による水粒子の移動距離

4.4.2 長期変形特性⁹⁾

シーリング材料の長期的変形性について、基礎的データを得るために長期クリープ試験を実施した。クリープ荷重としては地下1,000mを考慮して $260\text{kg}/\text{cm}^2$ を最大荷重とし、試験体はベントナイト、ベントナイトに珪砂及び泥岩粉を混合し、圧縮固化したものが用いられた。混合率は、それぞれ50%、75%を採用し、圧縮応力は $520\text{kg}/\text{cm}^2$ である。

試験の結果から、

- ①初期変形がクリープの性状を示しているのに対し、初期変形以降の性状には時間的依存性がほとんどない(図4.4-7, 8)
- ②最終変形量について見ると初期変形量が支配的であり、それ以降の進行は緩慢で約1年経過の時点で全ての試験体が最終変形量に達した。

などの予備的結論が得られた。

この試験では、クリープ応力は設置深度を模擬しているものの、設置状況を模擬しているとは言いがたい。したがって長期的なクリープ現象を予想するためには、実際の設置条件を模擬した環境での体積変化を求めて予測式をたてる必要がある。

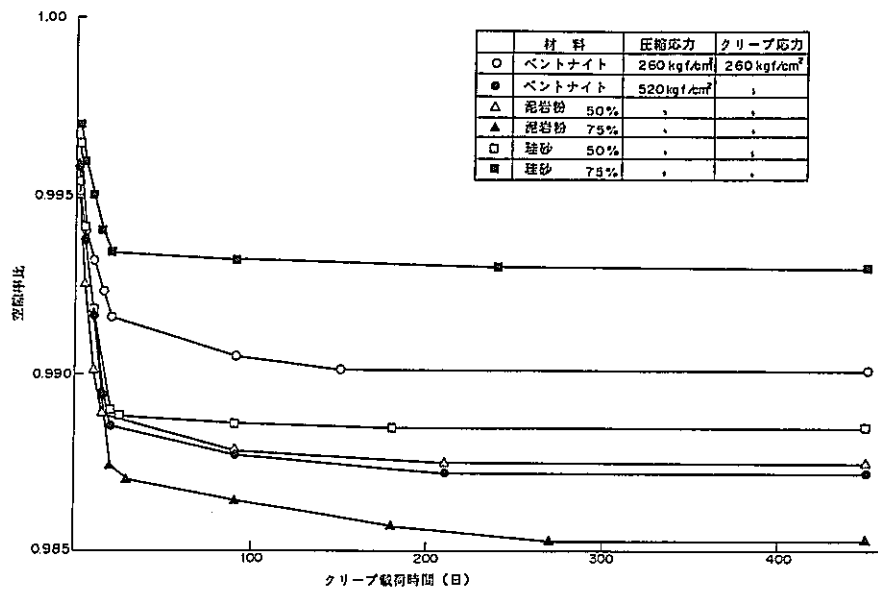


図4.4-7 クリープ時間と空隙率比の関係(1)

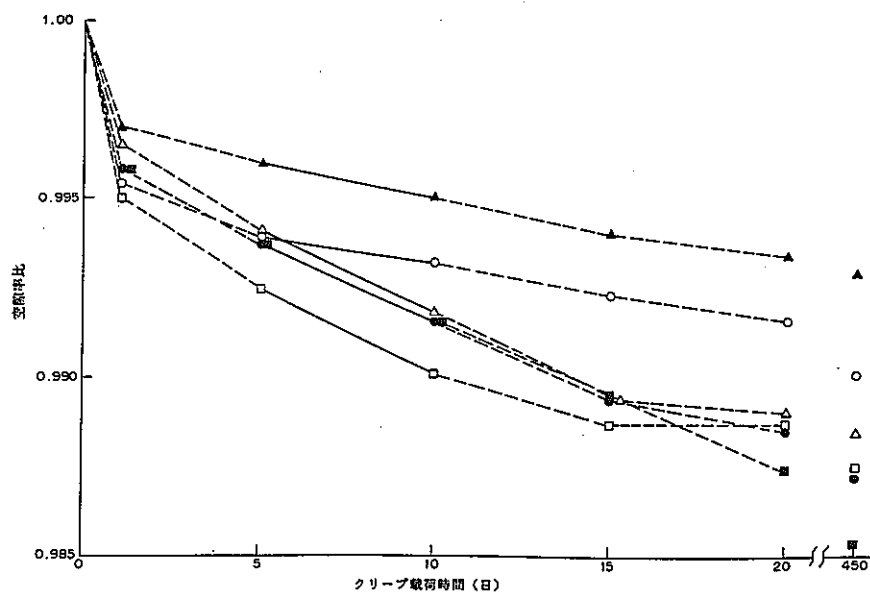


図4.4-8 クリープ時間と空隙率比の関係(1)

4.4.3 長期止水性⁹⁾

試験体としては、ベントナイト、ベントナイトに珪砂（50%）及び高炉セメントにシリカフェーム（50%）を混合し、圧縮固化したものをを用いた。試験は、地下1,000mを模擬した軸応力 260kg/cm^2 、透水圧を 50kg/cm^2 付加させ、経過日数による透水量の変化を測定した。

この試験結果から、

①透水係数は試験期間中ほぼ一定（図4.4-9）

②透水係数は、空隙率の3乗に比例する。4.4.2のクリープ現象でも空隙率の変化がほとんどないことから、透水係数の変化も少ないことが予測できる。

などの予備的結論が得られた。

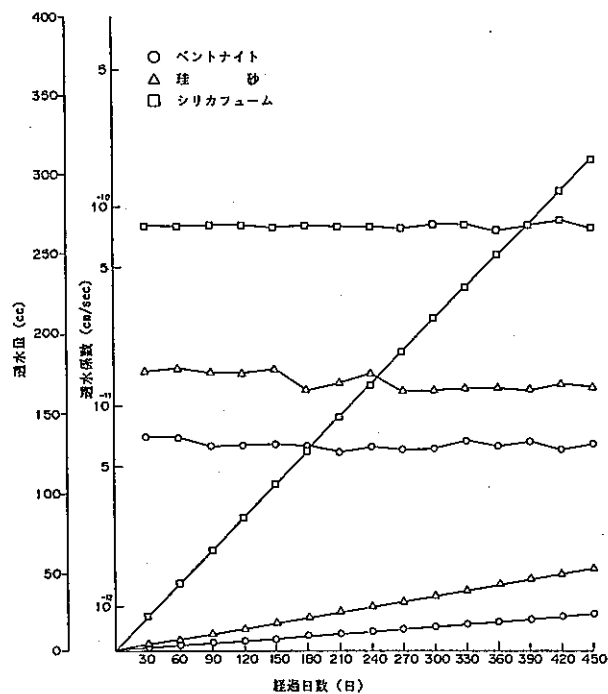


図4.4-9 透水量及び透水係数の関係

5. グラウト

5. グラウト

グラウト材料としては、その必要条件として①注入材料の粒径が細かい、②分散性が良く、ブリージング（ブリージングとは、まだ固まらないコンクリート中の水の上昇する現象をいう）が少なく、流動性が良い、③所要の強度があり、収縮性を起こさない、④耐久性があり、低透水性である、⑤熱特性が母岩に近いことなどが挙げられる。

グラウトについては粘土系、セメント系材料、水ガラス系が候補として挙げられる。

3章及び4章で粘土系、セメント系材料に関する一般的特徴についてすでに紹介済みであるので、ここでは、ストリパ計画でのセメント系材料に係わる知見及び水ガラスに関する事項について若干の説明を加えておく。

5.1 材料

5.1.1 候補材料

(1) セメント系材料¹⁾

セメント系材料について、ストリパ計画での試験¹⁵⁾では

- ①注入剤の水セメント比は、固結体の均質性、高性能減水剤の量及び固結体の長期健全性に影響するものと考えられる。しかし、水セメント比の小さいグラウト材を注入したものが耐久性に富んだ固結体になるとは限らない。
- ②グラウトの分散過程、混合効果に基づいての熱力学的な研究で、グラウトの長期耐久性についての決定的な結論は得られていない。
- ③花崗岩は地下水中でのグラウトの効果を緩衝する可能性がある。
- ④グラウトによる周辺岩盤の地下水のpHの変化は、自然の変動より少ないと推定される。

などの予備的結論が得られている。

(2) 水ガラス

水ガラス用溶液の濃度と粘性の関係を図5.1-1に示す。水ガラス系薬液が固結するのは、主剤である水ガラス中の SiO_2 分であり Na_2O 及び硬化剤中に含まれる薬液組成分が固結するわけではない。これらの固結しない組成分は固結物中に閉じ込められた形となっており、水ガラスの種類によらず、すべて溶出する可能性を持っている。 SiO_2 の固結物シリカゲルは、その水分が約90%であることから、地下水の流れにそって溶出するためその耐久性には問題がある。溶液型の場合、一ヶ月程度で大きく変動する可能性があり、また、温度や乾燥には抵抗力がない。即ち、空気中ではその炭酸ガスを吸収して変質するし、乾燥すると水分が蒸発して収縮する。

これらの点を考慮すると、長期的健全性及び化学的影響因子等の観点から、地層処分のシーリング材料としての適用は期待できないと考えられる。¹⁾

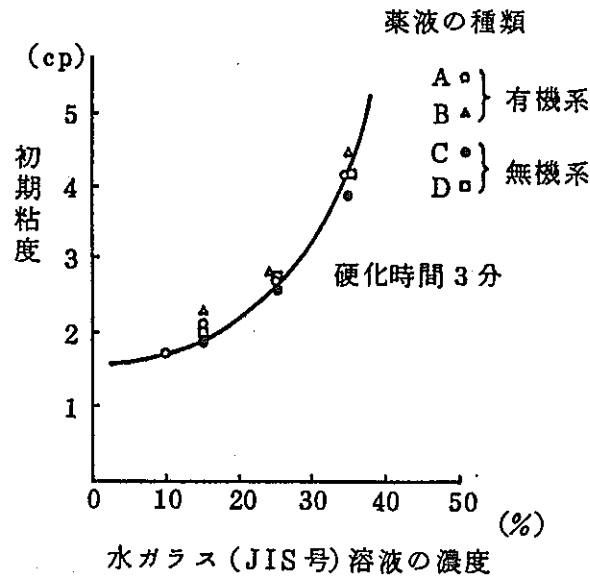


図5.1-1 水ガラスの粘性

5.1.2 材料特性

粘土系及びセメント系の両材料のグラウト材料としての材料特性試験結果を以下に述べる。

(1) 粘土系材料

粘土系材料のグラウト材としての適用性について、その浸透性に影響を与える粘性、ブリージング量と含水量及び粒子径との関係を述べる。試料としてはベントナイトを用い、300メッシュ (46 μ m)、250メッシュ (63 μ m)、水ベントナイト比は500%、1000%である。

含水量及び粒子径と粘性、ブリージング量との関係を図5.1-2～5に示す。これらの結果から、粘性については、含水量は粘性に大きな影響を与え、それは300メッシュの方が大きく、粒子径との関係は1000%では殆ど差がないのに対して、500%では300メッシュの粘性は250メッシュの粘性の2倍となる。

また、ブリージング量については、含水量が小さくなるとブリージング量は減少する。以上のことから、粘性とブリージング量は含水量及び粒子径との関係において逆の傾向を示す。

地層処分においては、従来の土木工事で対象とされなかった小さな亀裂に対してもグラウトが必要となることを考慮すると、材料自体が極めて微細であることが要求される。したがって、それに伴い増加する粘性の問題については、分散剤等によって改善を図ることが必要となる。

ベントナイトのそれらの値として、粘度は $10 \sim 10^3$ cp、ブリージング量は 0.015 ~ 0.16 cm である。¹⁾

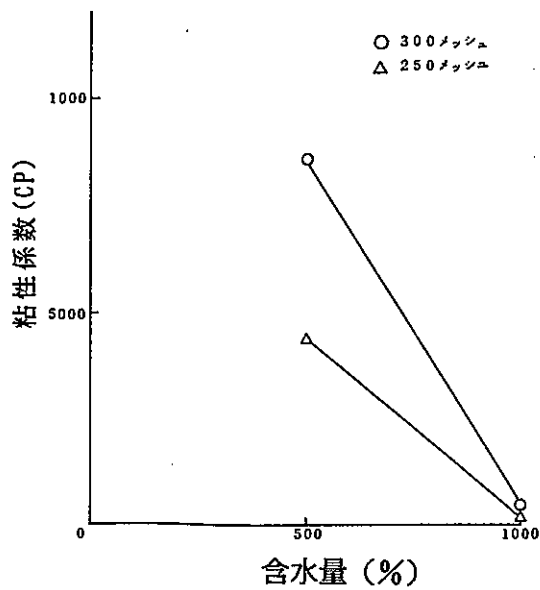


図5.1-2 ベントナイトの含水量と粘性係数の関係

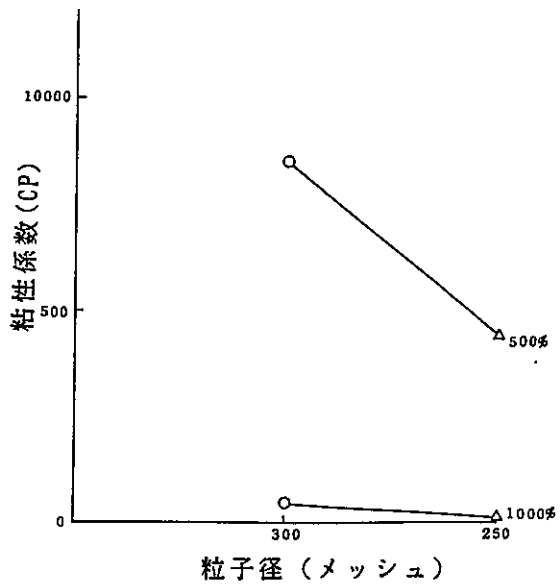


図5.1-3 ベントナイトの粒子径と粘性係数の関係

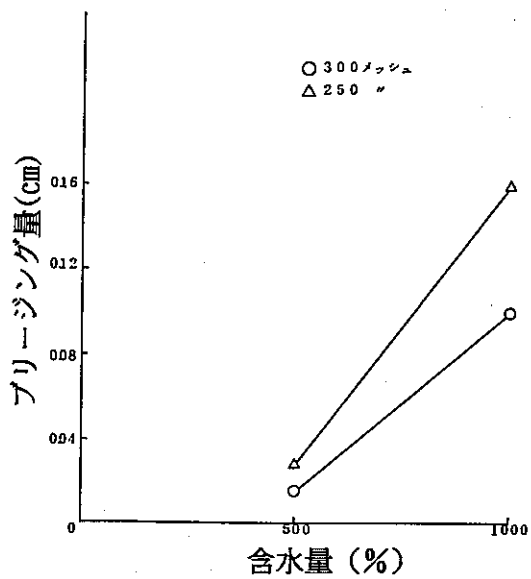


図5.1-4 ベントナイトの含水量とブリージング量の関係

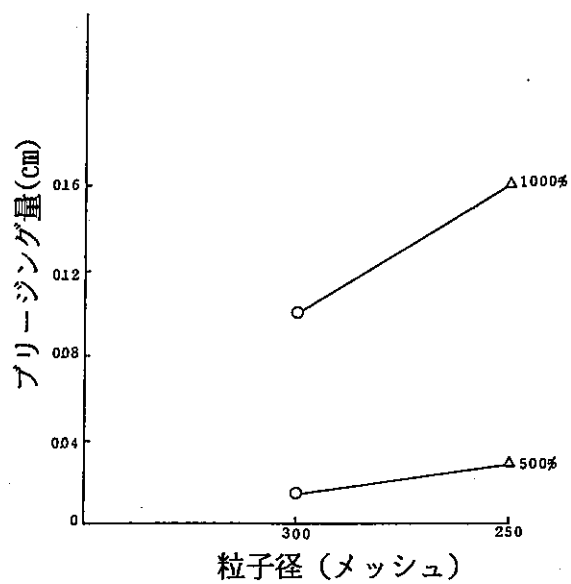


図5.1-5 ベントナイトの粒子径とブリージング量の関係

(2) セメント系材料

1) 単一材料

(a) 懸濁液としての特性

セメント系材料のグラウト材としての適用性について、普通ポルトランドセメント、耐硫酸塩セメント、コロイドセメント、微粒子セメント、それぞれに関する粘性、ブリージング量と含水量及び粒子径との関係について述べる。

試料としては、①50 μ ；普通セメント、耐硫酸塩セメント、②40 μ ；普通セメント、③30 μ ；コロイドセメント、耐硫酸塩セメント、④10 μ ；微粒子セメント、⑤5 μ ；微粒子セメントの5段階に粒径を調整し、水を配合、セメントペーストとした材料である。

セメントの含水量及び粒子径と粘性、ブリージング量との関係を図5.1-6～9に示す。これらの結果から、粘性については含水量及び粒子径はその懸濁液の粘性に大きく影響し、全体的に含水量は100%以上が有利である。粒子径との関係からは、粒子径を細かくすると、同一含水量でも粘性は大きくなること分かる。

また、ブリージング量については、水セメント比の増加に伴って直線的に増加し、粒子径が細くなるほどその量は減少する。

以上のことから粒子径が細かいほどブリージングに対して有利であるが粘性が増加するという相反する傾向を示す。したがって、混和材等により粘性の改善を図る必要がある。¹⁾

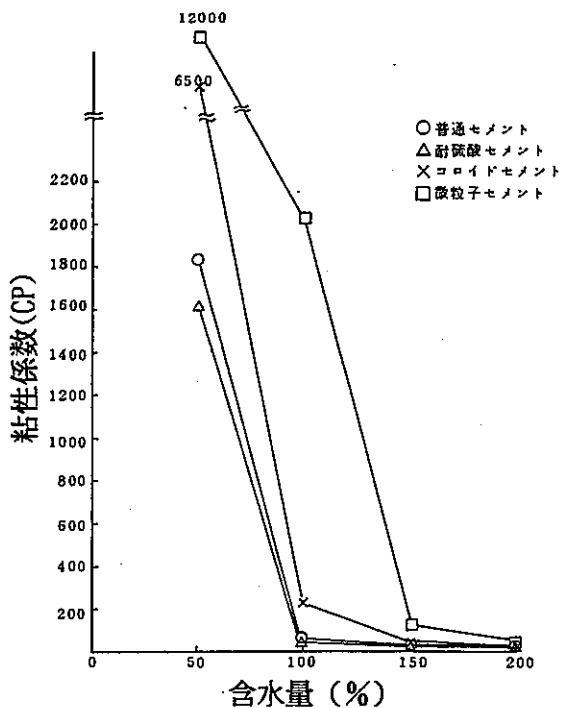


図5.1-6 セメントの含水量と粘性係数の関係

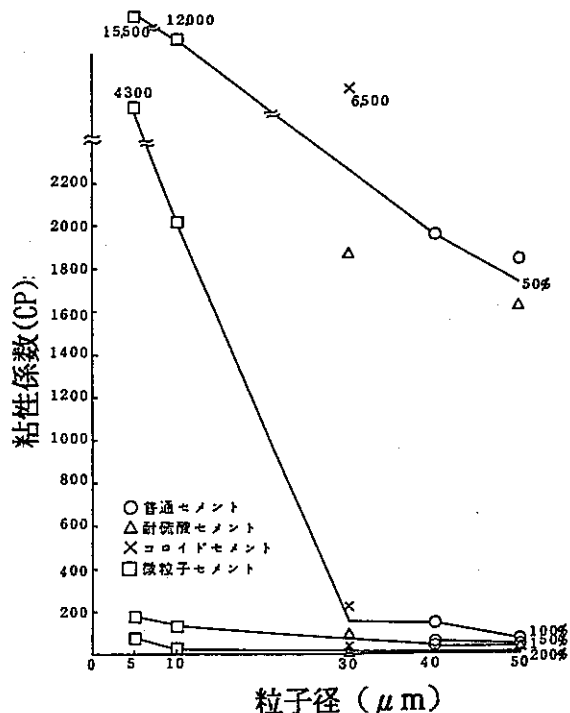


図5.1-7 セメントの粒子径と粘性係数の関係

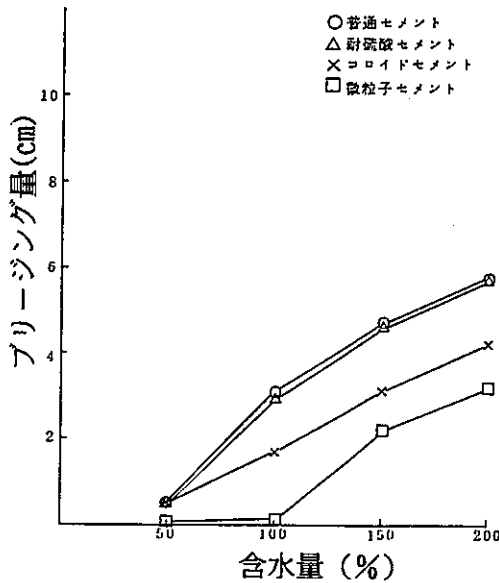


図5.1-8 セメントの含水量とブリージング量の関係

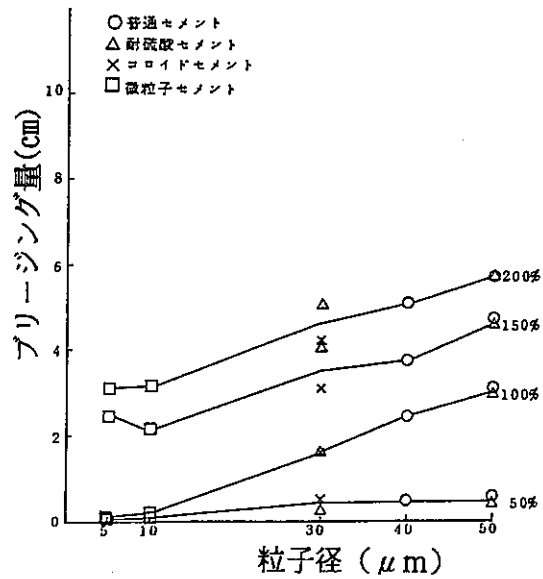


図5.1-9 セメントの粒子径とブリージング量の関係

(b) 固結体としての特性

a) 吸水率と有効空隙率

セメント固結体の含水量及び粒子径と吸水率の関係を図5.1-10、11に、さらに有効空隙率と含水量及び粒子径の関係を図5.1-12、13にセメントの種類をパラメータとして示す。これらの図で、吸水率、有効空隙率ともに同様な傾向を示している。即ち、濃度が100%以下の場合には粒子径の増加に伴って空隙率も増加するが、逆に濃度が100%以上の場合には粒子径の増加にしたがって空隙率が減少する。これはセメント粒子の保水性によるものと考えられ、セメントの粒径が小さくなると保水性が大きくなり、濃度が貧配合になるとセメント粒子の回りに水をかかえこみ、空隙が大きくなる。

吸水率との関係においても、空隙率と同様な傾向が見られその割合は空隙率より大であり、バランス点は濃度100%~50%の間である。¹⁾

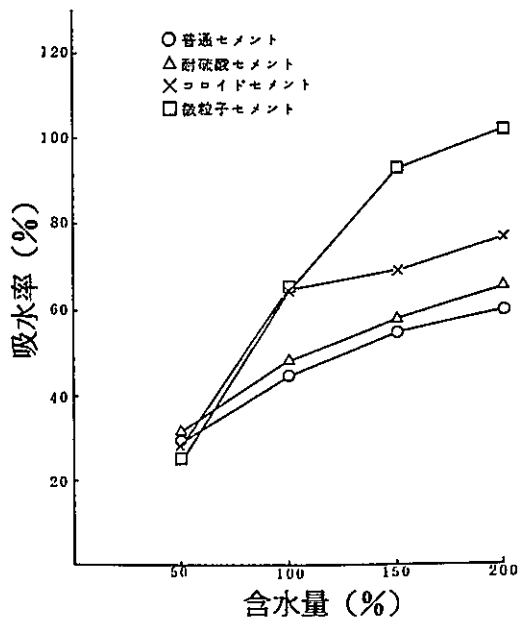


図5.1-10 セメントの含水量と吸水率の関係

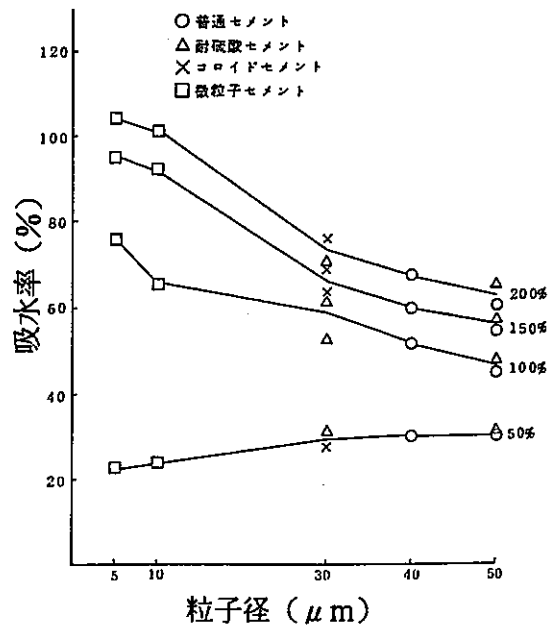


図5.1-11 セメントの粒子径と吸水率の関係

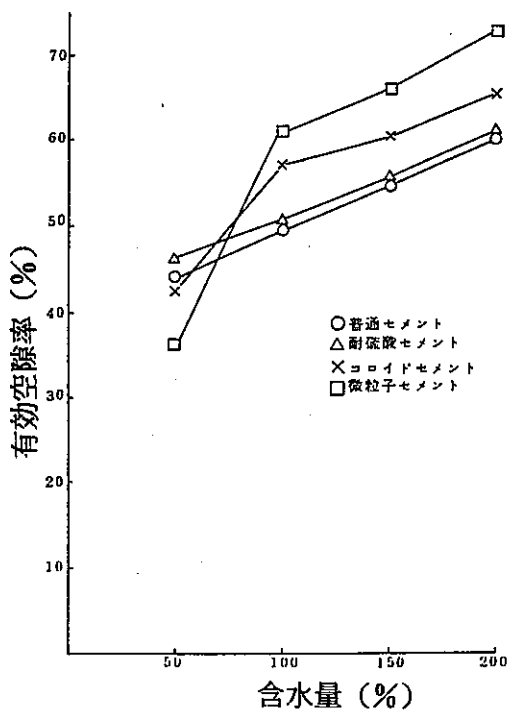


図5.1-12 セメントの含水量と有効空隙率の関係

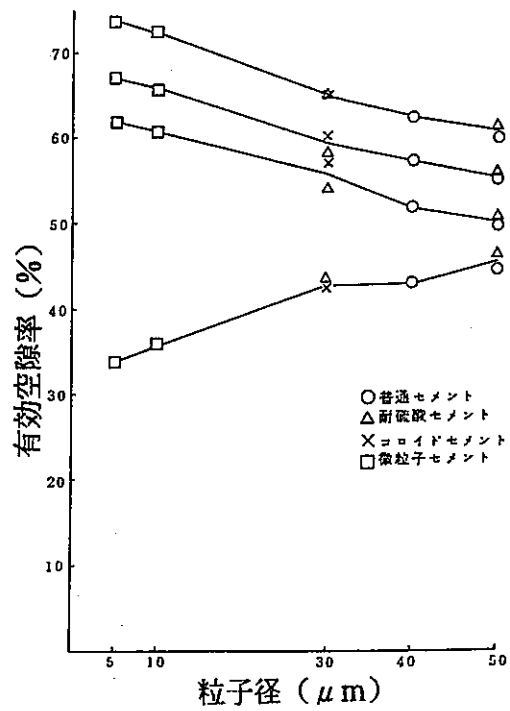


図5.1-13 セメントの粒子径と有効空隙率の関係

b) 乾燥比重と湿潤比重

セメント固結体の含水量及び粒子径と乾燥比重の関係を図5.1-14, 15に、湿潤比重との関係を図5.1-16, 17にセメントの種類をパラメータとして示す。これらの図から乾燥比重は、含水量の増加に従って減少し、反対に湿潤比重の増加に伴って増加する。これは固結体がポーラスで水を含む量、即ち、吸水率が大きくなることを示している。これらの傾向は、前述のa)の如く、コロイドセメントや微粒子セメントなど粒径の細かいセメントの方がきくなるのは保水性のためである。¹⁾

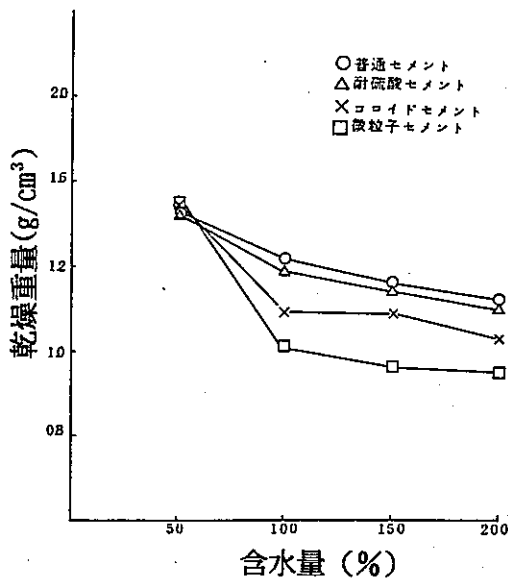


図5.1-14 セメントの含水量と乾燥重量の関係

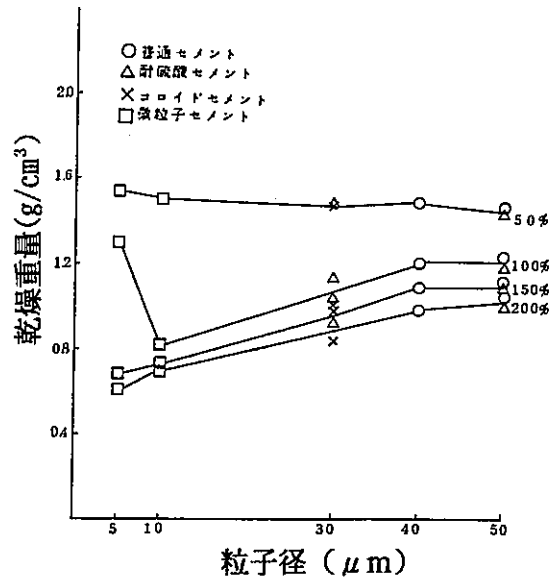


図5.1-15 セメントの粒子径と乾燥重量の関係

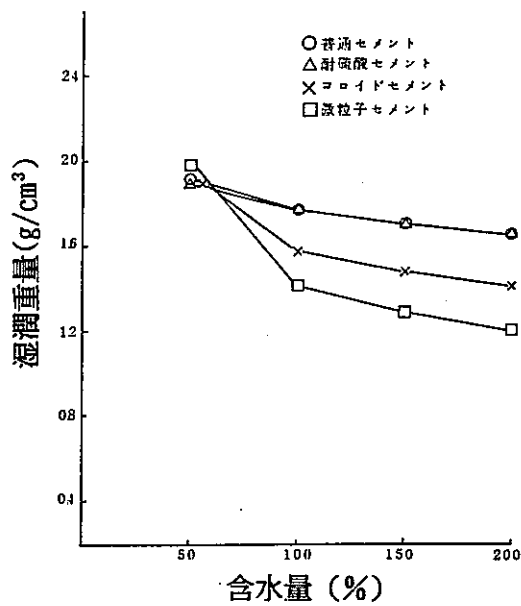


図5.1-16 セメントの含水量と
湿潤重量の関係

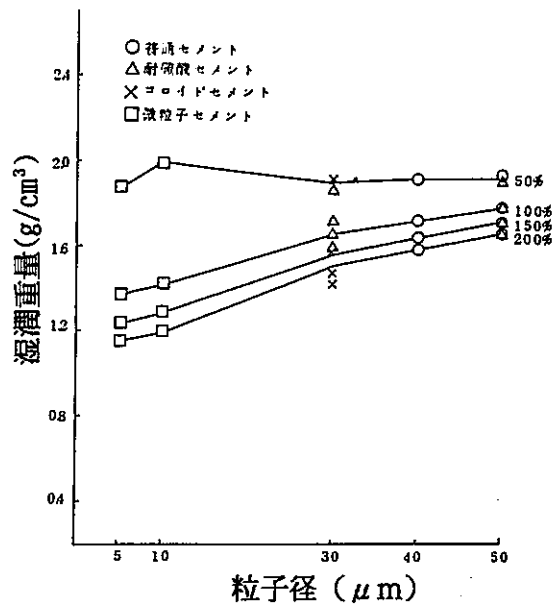


図5.1-17 セメントの粒子径と
湿潤重量の関係

c) 力学的特性

セメント固結体の圧縮強度と含水量及び粒子径との関係を図5.1-18, 19に示す。これらの図から明らかなように、含水量は圧縮強度に強く影響し、各セメントともに同じ傾向を示す。即ち、力学的強度は水セメント比によって決まる。粒子径と圧縮強度の関係は、粒子径が細くなる程圧縮強度は強くなる。また、材令と強度の関係をセメントの種類をパラメータとして図5.1-20に示す。この図から、粒子径の細かなセメントほど早期強度が高く、最終強度も高くなる。これから、固結したセメントミルクの強度は $100\sim 300\text{Kg/cm}^2$ の値である。

また、セメント固結体の含水量及び粒子径と弾性波速度との関係をセメントの種類をパラメータとして図5.1-21, 22に示す。この図から明らかなようにP波及びS波の速度は含水量の増加に伴って直線的に減少する。また、セメントの種類で見ると全て同じ傾向を示し、ほぼ平行な関係である。その速度は、P波・S波共に微粒子セメント>コロイドセメント>耐硫酸塩型セメント>普通ポルトランドセメントの順序である。その値はP波速度で 2.5Km/s 前後、S波速度で 1.0Km/s 前後の値を示している。¹⁾

d) 透水特性

セメント固結体の透水係数と含水量及び粒子径との関係を図5.1-23, 24に示す。これらの図から明らかなように、含水量の増加に伴って透水係数も増加する。この関係をポルトランドセメントと微粒子セメントで比較すると後者の方が含水量の影響を強く受ける。これは、微粒子セメントは

含水量の増加に伴って空隙率の増加が著しいからである。粒子径との関係は粒子径が細かい程、透水係数も小さいことが分かる。透水係数としては $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/sである。¹⁾

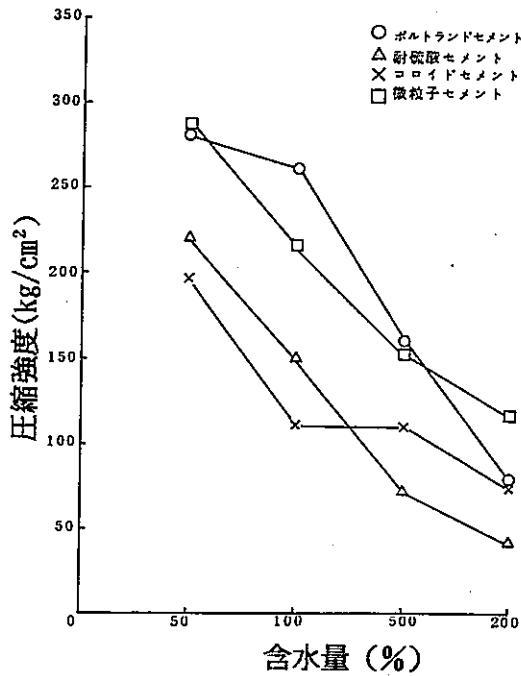


図5.1-18 セメントの含水量と圧縮強度の関係

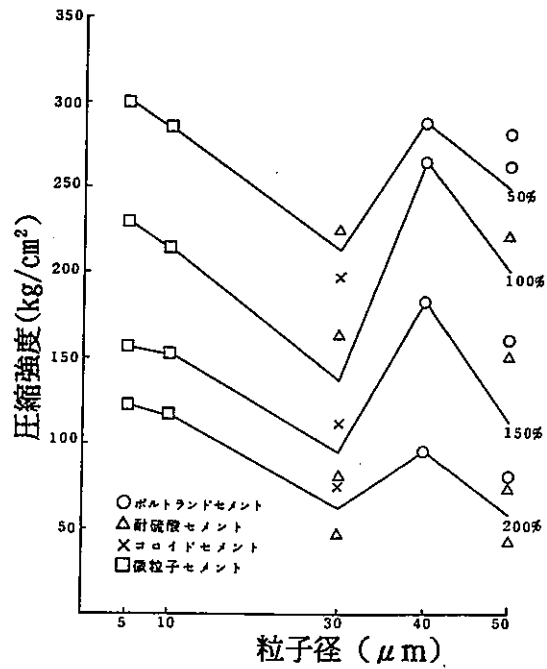


図5.1-19 セメントの粒子径と圧縮強度の関係

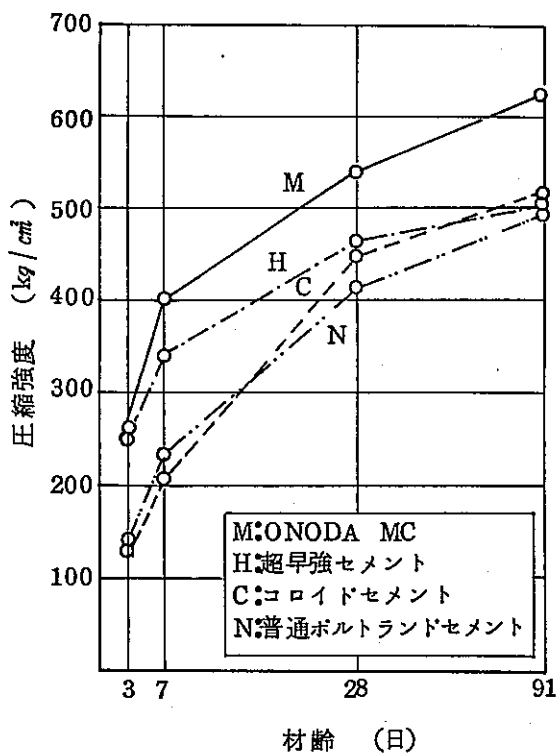


図5.1-20 材令と圧縮強度の関係

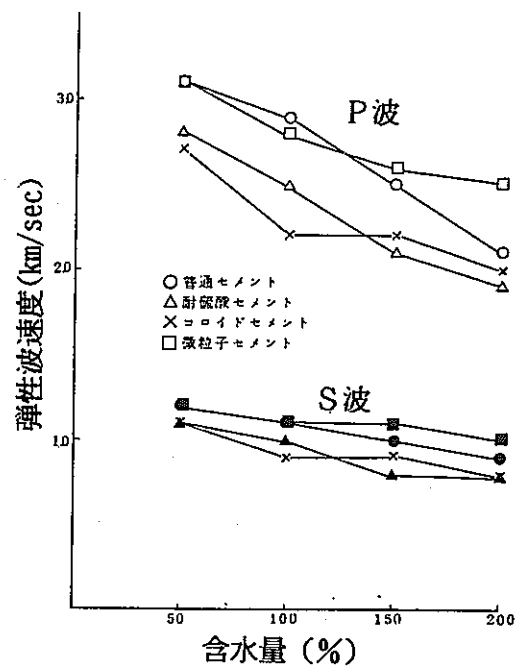


図5.1-21 セメントの含水量と弾性波速度の関係

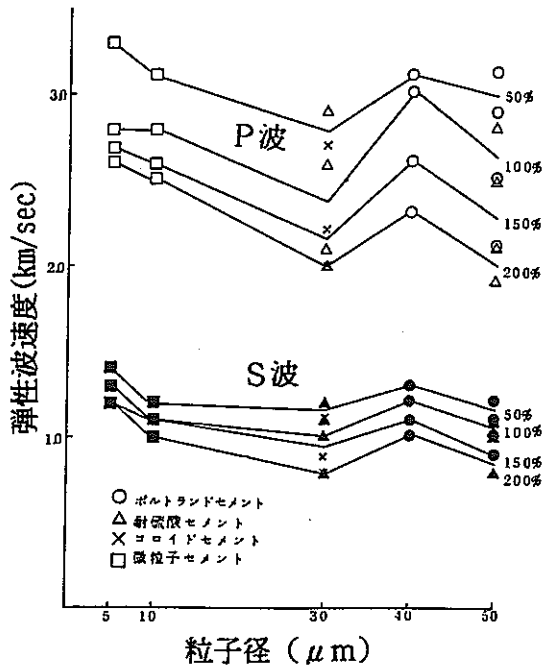


図5.1-22 セメントの粒子径と弾性波速度の関係

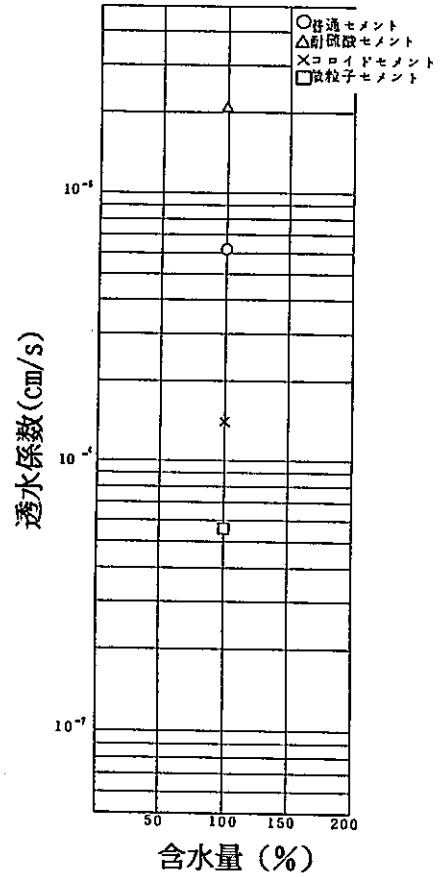


図5.1-23 セメントの含水量と透水係数の関係

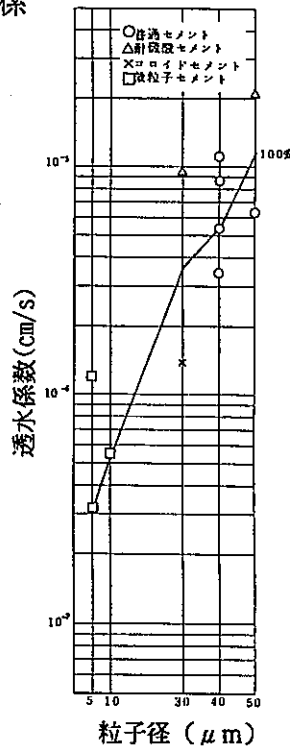


図5.1-24 セメントの粒子径と透水係数の関係

e) 熱特性

セメント固結体の熱伝導率と含水量及び粒子径との関係を図5.1-25, 26に示す。これらの図から明らかなように、含水量の増加に伴って熱伝導率は減少する。また、粒子径も細くなるにつれて熱伝導率が減少する傾

向が見られる。熱伝導率は圧縮ベントナイトと同程度の $0.7 \sim 1.0 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ の範囲にあり、花崗岩の熱伝導率 $2 \sim 3 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ に比べて2~3倍小さな値を示す。¹⁾

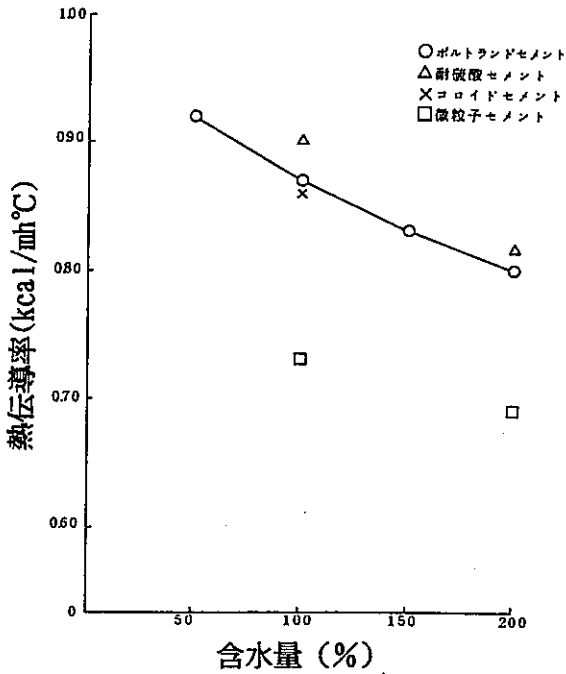


図5.1-25 セメントの含水量と熱伝導率の関係

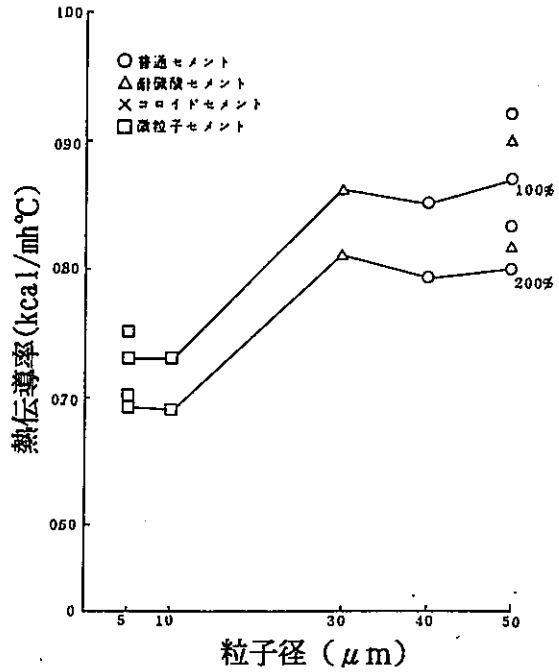


図5.1-26 セメントの粒子径と熱伝導率の関係

2) 複合材料

(a) 懸濁液としての特性

ポルトランドセメント+粘土について含水量及び粒径と粘性の関係を図5.1-27, 28に示す。これらの結果から、含水量の方が粒径よりも粘性に与える影響が大きいことを示している。また、同様にブリージングとの関係(図5.1-29, 30)から、ブリージングに対して濃度が支配的であるもののその絶対量は小さい。¹⁾

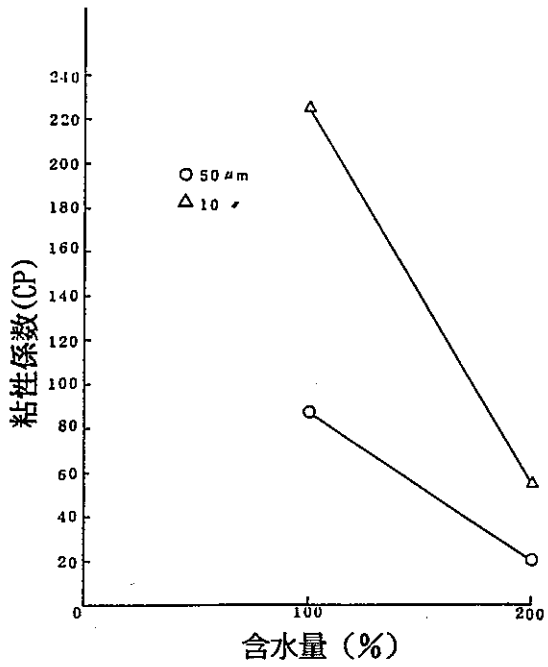


図5.1-27 セメント+粘土の含水量と粘性係数の関係

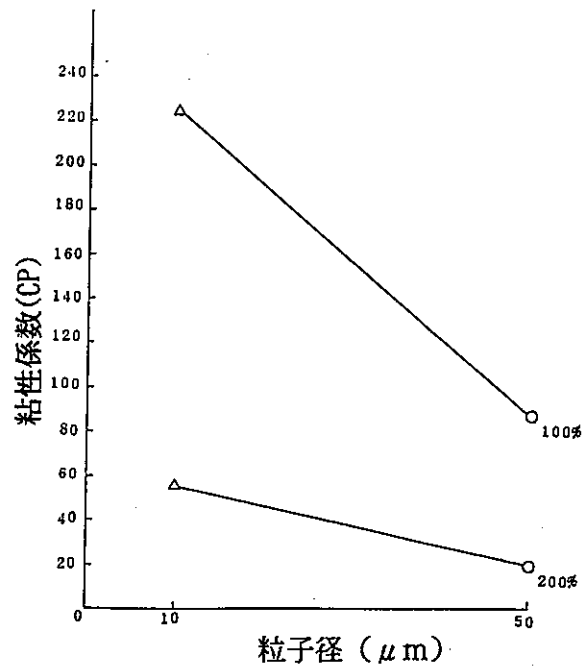


図5.1-28 セメント+粘土の粒子径と粘性係数の関係

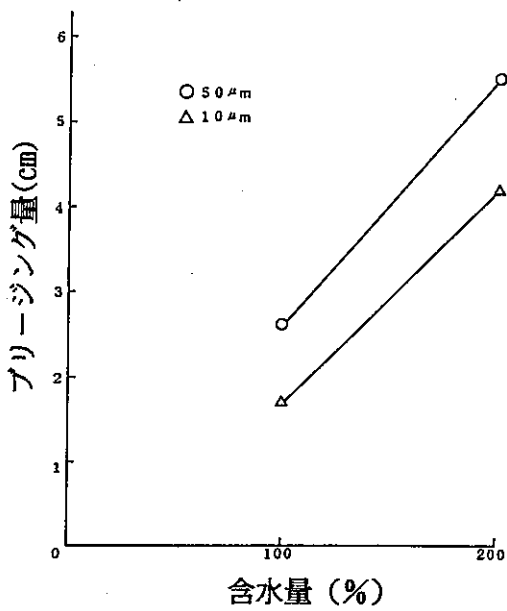


図5.1-29 セメント+粘土の含水量とフリージング量の関係

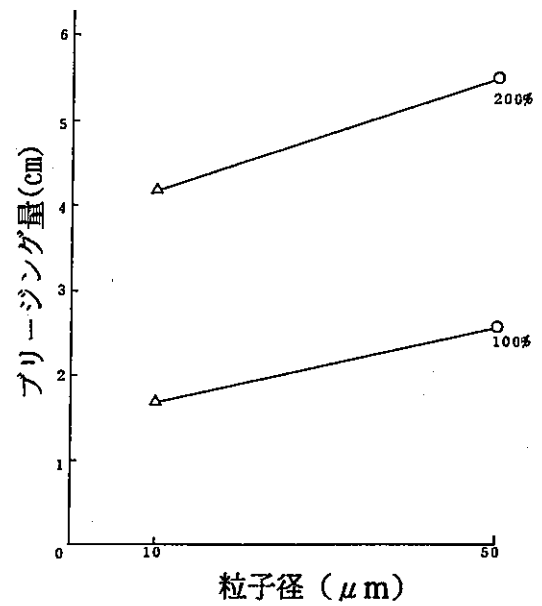


図5.1-30 セメント+粘土の粒子径とフリージング量の関係

(b) 固結体としての特性

a) 物理特性

力学的特性としては、圧縮強度と含水量の関係及び粒子径との関係（図5.1-31, 32）から、強度は含水量に依存する。

透水特性（図5.1-33, 34）については、セメント単独とほぼ同じ値を示している。

熱伝導率の値（図5.1-35, 36）についてもセメント単独と変わらず0.7～1.0kcal/mh°Cを示す。

弾性波速度と含水量及び粒子径との関係をそれぞれの配合の場合を図5.1-37, 38に示す。これらの結果から、弾性波速度は粒子径よりも濃度に強く影響していることが分かる。¹⁾

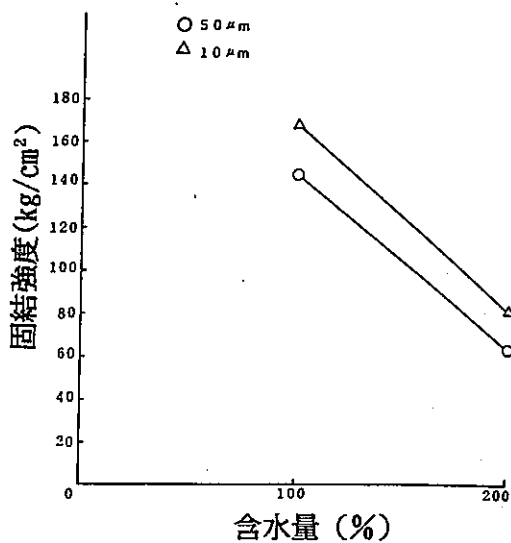


図5.1-31 セメント+粘土の含水量と固結強度の関係

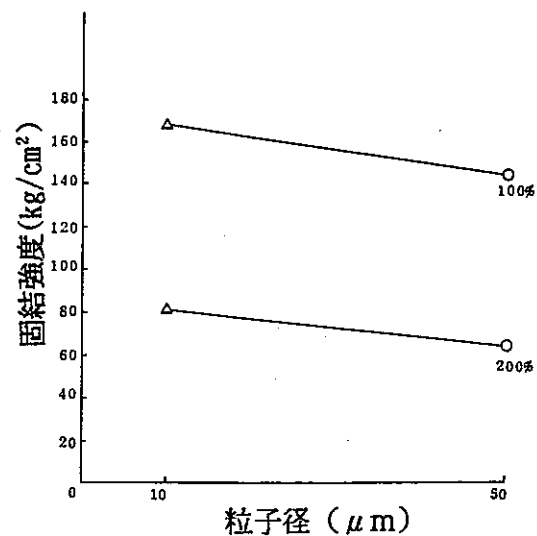


図5.1-32 セメント+粘土の粒子径と固結強度の関係

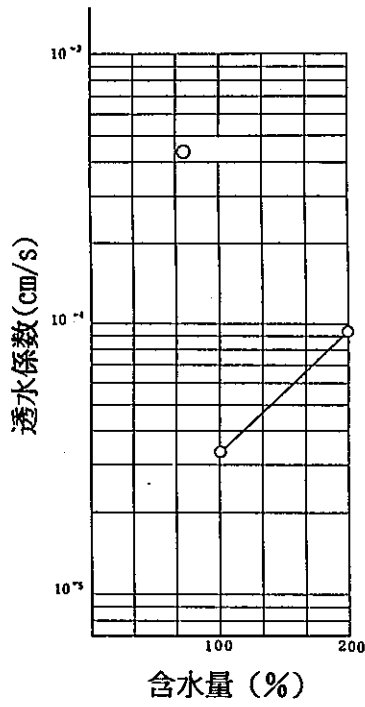


図5.1-33 セメント+粘土の含水量と透水係数の関係

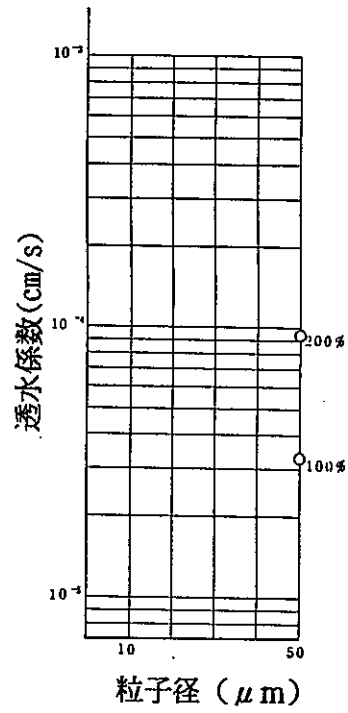


図5.1-34 セメント+粘土の粒子径と透水係数の関係

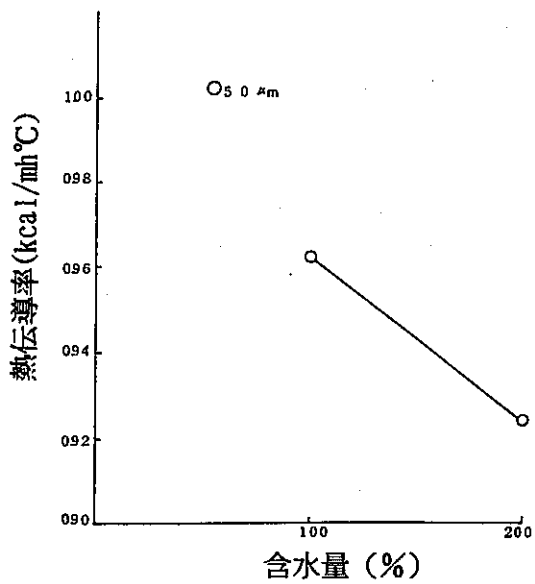


図5.1-35 セメント+粘土の含水量と熱伝導率の関係

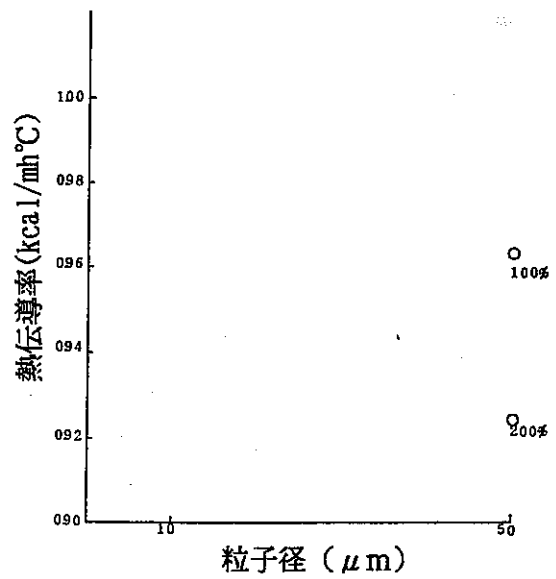


図5.1-36 セメント+粘土の粒子径と熱伝導率の関係

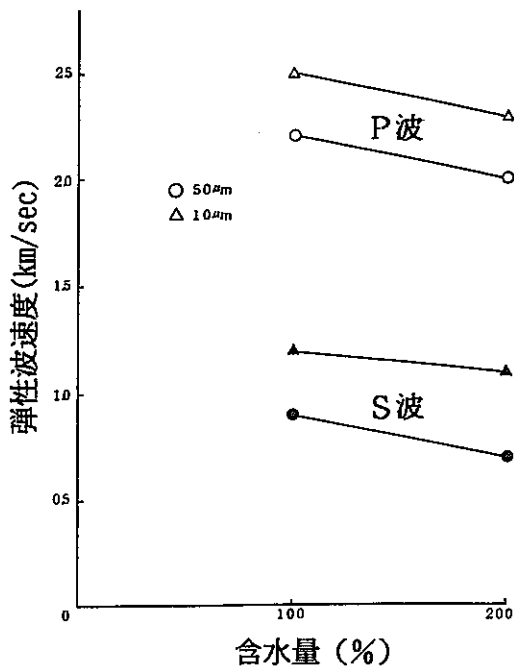


図5.1-37 セメント+粘土の含水量と弾性波速度の関係

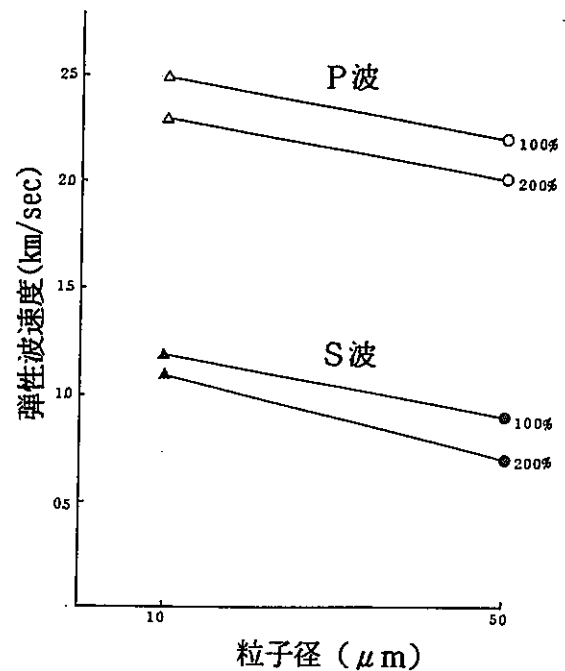


図5.1-38 セメント+粘土の粒子径と弾性波速度の関係

b) 温度依存性

上記に示した特性のうち、力学的強度、熱的特性の温度に対する変化を把握するため、その温度依存性について、さらには、黒雲母花崗岩の熱伝導率及び圧縮強度と温度の関係について以下に述べる。

選定したグラウト材はコロイドセメントと木節粘土（第三紀鮮新世前期の堆積性の層状粘土で、粘土層中に炭化した木片を含むので、この名がある。瀬戸市、多治見市、三重県に産し、耐火物、陶磁器等に用いられている。）の混合物で、水セメント比75%、混和量7.50wt%のもので、粘性係数は3450cp、ブリージング率は0.9%である。⁴⁾

① グラウト固結体の熱伝導率の温度依存性

図5.1-39に湿潤、熱間、冷間状態におけるグラウト固結体の熱伝導率と温度の関係を示す。グラウト固結体の熱伝導率の温度依存性は、温度無関係型の傾向を強く示している。このことは固化体からの放熱で周囲の温度が上昇しても熱の伝達が悪くなる方向ではないので人工バリアの特性としては有利な条件となる。また、熱間試料と冷間試料の熱伝導率には差がないが湿潤試料と比べると3割程度に減少している。湿潤試料の場合は、空隙率約60%の空隙に水が満たされている状態であるから、空気と水の熱伝導率の差によりこのような結果が得られたものであると考える。⁴⁾

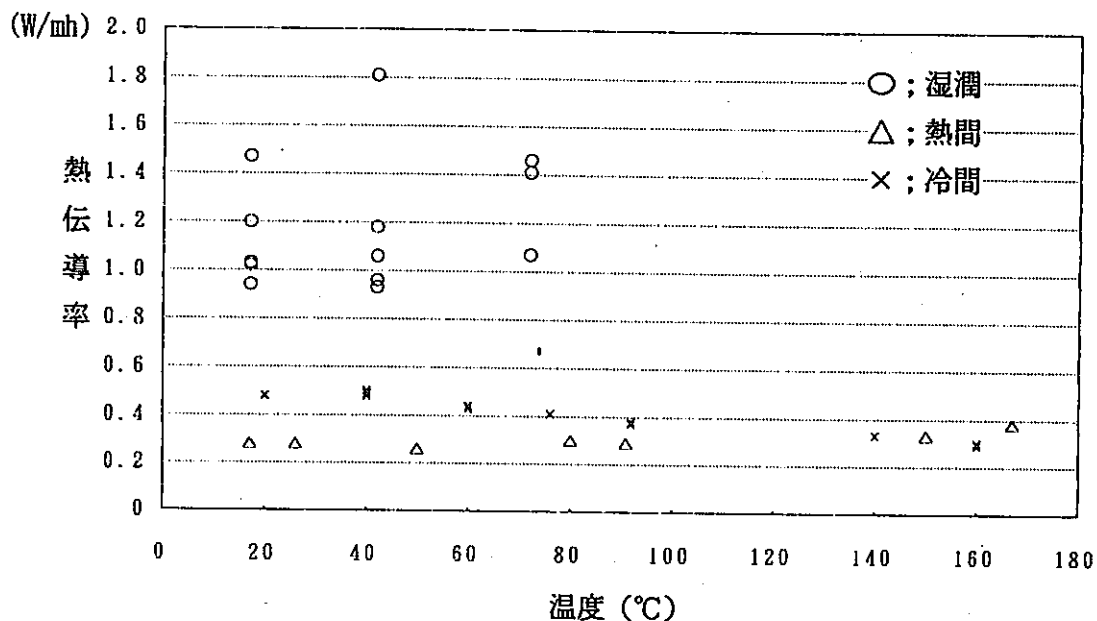


図5.1-39グラウト固結体の温度と熱伝導率の関係

② グラウト固結体の圧縮強度の温度依存性

グラウト固結体の圧縮強度は温度が上昇すると熱間強度、冷間強度、湿潤強度とも同様の傾向で減少するが、圧縮強度の大きさは図5.1-40に示すように熱間、冷間強度と比較すると湿潤強度は低い。このように空隙が水で満たされた場合に圧縮強度が減少するのは、空隙中の水の存在により粒子の結合力及び摩擦抵抗が減少した結果であると考えられる。⁴⁾

③ 花崗岩の物性値の温度依存性

図5.1-41, 42に熱伝導率及び圧縮強度と温度の関係をグラウト固結体のそれも併記して示す。花崗岩の熱伝導率の温度依存性は、温度反比例型の傾向を示すとともに圧縮強度も単調に減少している。また、花崗岩とグラウト固結体の熱伝導率を比較すると、湿潤状態で約50%、乾燥状態で約15%程度である。⁴⁾

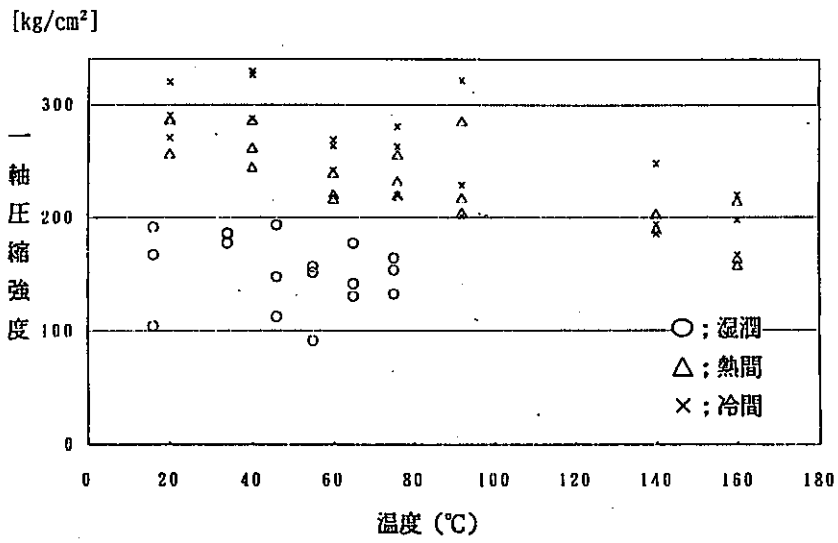


図5.1-40 グラウト固結体の一軸圧縮強度の関係

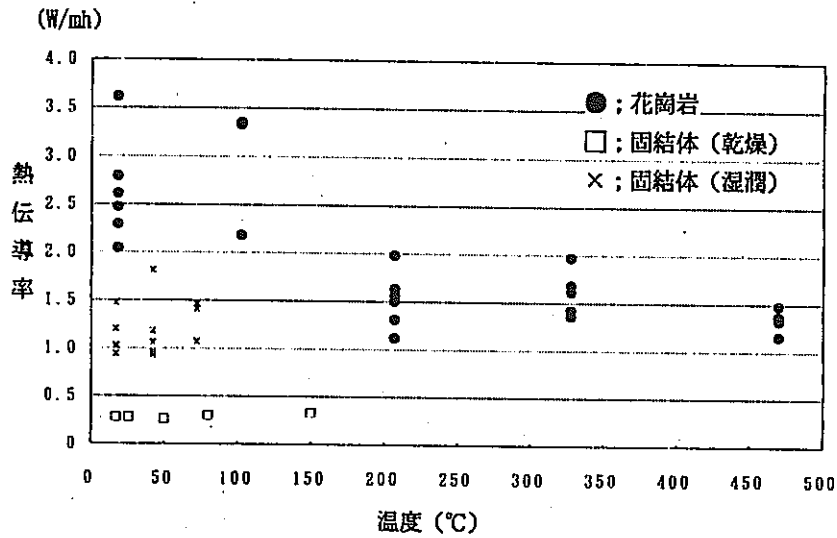


図5.1-41 花崗岩及びグラウト固結体の熱伝導率と温度の関係

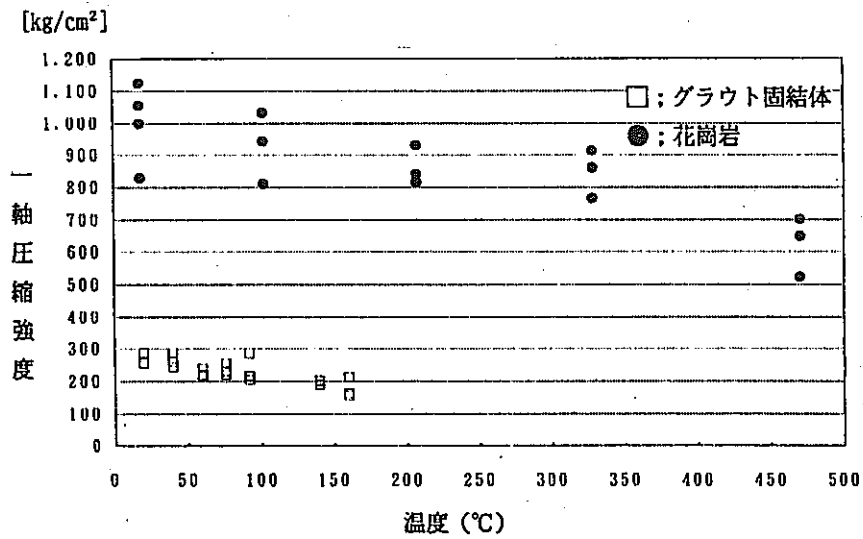


図5.1-42 花崗岩及びグラウト固結体の温度と強度の関係

5.2 基本仕様

処分場はできるだけ割れ目の少ない地層中に設置されるように計画されるが、処分場として利用する領域中には少なからず地下水の流動を有する節理、断層等の不連続部が存在したり、掘削により乱された緩み領域等が存在することが予想される。

グラウトは、このような状況の地山を止水、強度の面から補強する技術として有効な手段として適用されている。

グラウトの設計は注入の目的に応じて、①注入工法、②材料の選択、③注入範囲、④注入量、注入圧、⑤配合、ゲルタイム、⑥注入孔配置が検討対象となる。

従来の注入技術においては、主に止水、地山強化、変状防止を目的にグラウトが実施されており、止水を目的とした場合には粘土系が、強度の増加を図る場合にはセメント系の注入材料が選択される場合が多い。

処分場で使用する代表的なグラウト材料としては、微粒子セメント、熱水セメント、ベントナイトが挙げられるが、それぞれに問題点もある。

これらの諸問題を解明するために、ストリパプロジェクトでは割れ目系岩盤に対するグラウト材料、施工法の開発を進めており、それぞれの使用場所として、廃棄体近くの岩盤では熱の影響や高止水性、耐久性のあるシールが必要との考えから膨潤性を基本とした材料、すなわちベントナイト系を使用し、変状帯や自然の割れ目帯へのグラウトは長期間大きな変化にさらされることを考慮し、セメント系材料の適用を考えて材料開発を行っている。

一方、施工方法として一般的に実施されている静的注入では、高圧で注入を行うにしても、ストリパで対象としているような $100\mu\text{m}$ 程度の割れ目への注入は、超微粒子セメントを使用しても非常に難しく、動的注入法を試みるなどの技術の開発を行っている。我が国においても動的注入法（超音波を利用した注入方法）の試験をストリパに先んじて実施したが、基礎的な研究に留まっていることから、ここで示すグラウトの概念仕様はストリパの試験成果を踏まえて設定したものである。

また、対象とする割れ目の性状、分布については、堆積岩、結晶質岩系でそれぞれ特徴が異なるが、 $100\mu\text{m}$ 程度の割れ目幅を有するものまで注入を行うことを考慮するものとする。³¹⁾

(1) 材料

以下の2種類の材料を、使用場所、使用目的によって使い分ける

- ① ベントナイト系材料・・・高止水、耐久性を要する部位への使用
(処分坑道等の埋め戻し坑道周辺地山の)
自然割れ目の止水
- ② セメント系材料・・・強度補強、荷重変動が予測される部位への使用
(プラグ設置箇所、変状帯、規模の大き)
な割れ目帯、地山強度補強を伴う止水

(2) 注入工法

基本的に動的注入工法とし、対象地山の特性を考慮した注入圧、振動数を与えて注入する。

5.3 施工

動的注入工法（超音波注入工法）については、基礎的研究段階であることから、ここでは、グラウトの一例として湧水に対する従来の工法について、その適用例を、今回設定した処分場仕様を基に概説する。³¹⁾

(1) 湧水に対する工法

先進ボーリングにより湧水が大量出水のおそれのある場合、または施工に支障すると判断された場合は、補助工法として止水注入を計画する。

地下1,000mでの注入を考慮し、吐出圧力400kg/cm²級の高圧ポンプを準備する。

- ①工法；短管によるパッカー注入（φ65m/m）
- ②注入材；セメントミルク LW
- ③施工長；最大50m（設備としては50m規模まで考慮する）
- ④有効改良長；40m
- ⑤削孔長；1,870m（注入孔35本 チェック孔9本）
- ⑥注入ゾーン；7.5m（図5.3-1参照）

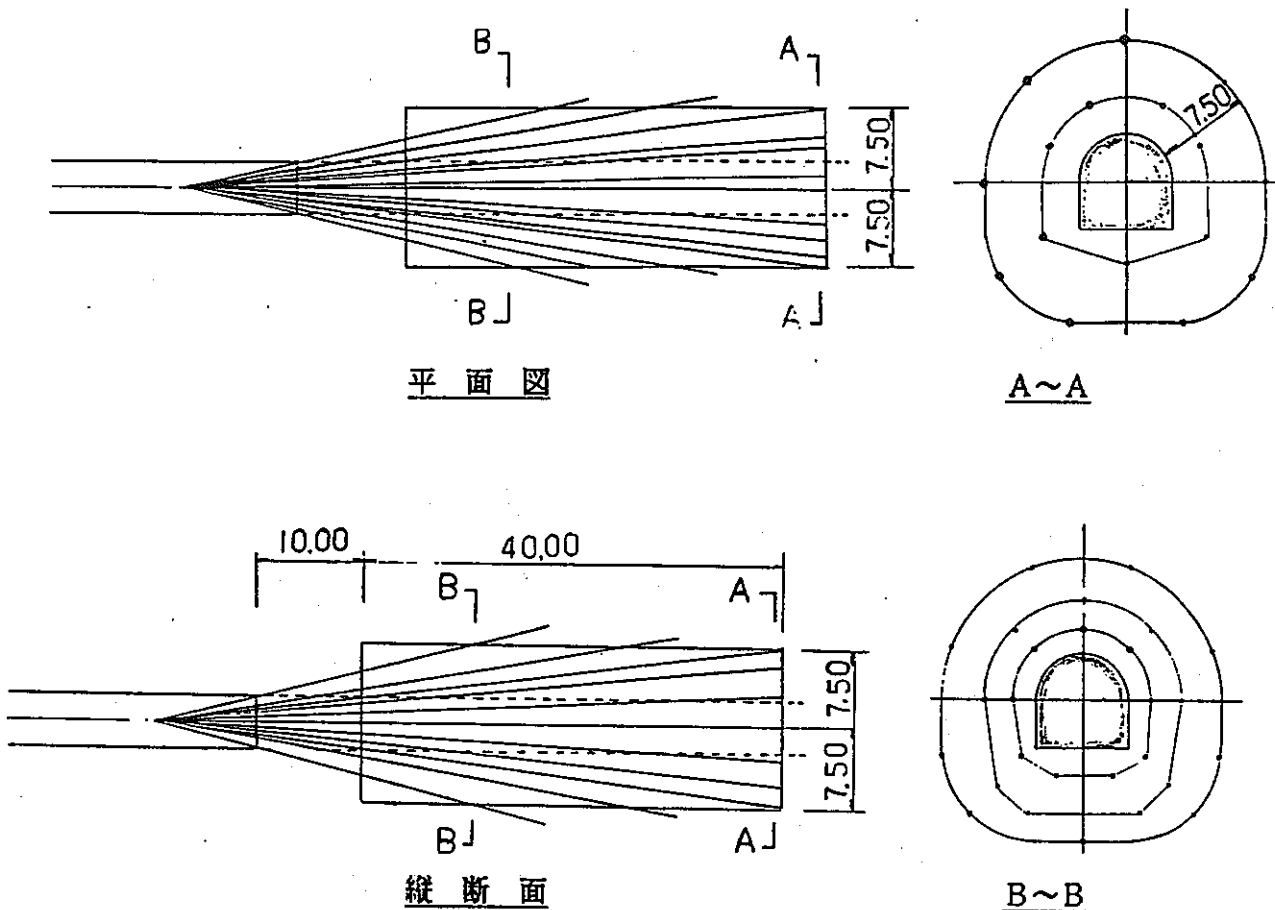


図5.3-1 注入標準配孔図

5.4 機能評価

5.4.1 注入効果の確認

地層処分の対象となる岩体には、各種の亀裂の存在が考えられる。そのため、亀裂の形態、大きさに対するグラウトの注入効果を把握するため、粘土系、セメント系の両材料を用いて試験検討を行った。

注入対象となる試料は、花崗岩試料（ $\phi 80\text{mm}$, 1200mm ）を用いそれに人工的な亀裂を2タイプつくり（図5.4-1）グラウティングした。

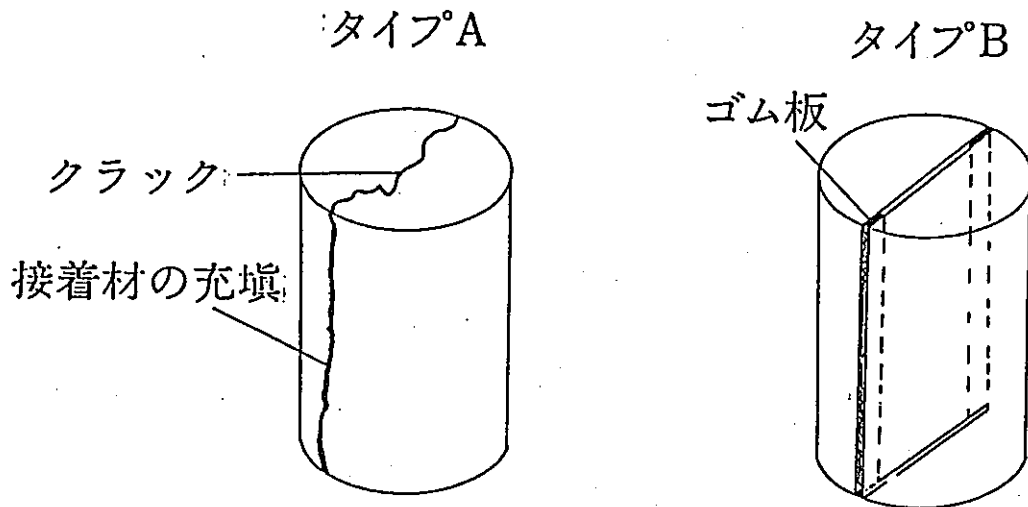


図5.4-1 試験対象亀裂の種類

(1) 試料の種類と透水性

各試料の試験前・後の透水係数を表5.4-1に示す。グラウトの注入効果を試験前の透水係数(k_1)と試験後の透水係数(k_2)の比 k_1/k_2 とするとタイプBの方が1オーダー注入効果が高い。これは、タイプBの注入材料の濃度がタイプAよりも濃いことが影響していると考えられる。⁷⁾

表5.4-1 試験前後の透水係数

試験番号	タイプ	補強材の種類	試験前の透水係数 k_1 (Darcy)	試験後の透水係数 k_2 (Darcy)	$\frac{k_1}{k_2}$
1	A	粘土	1.2×10^{-2}	5.5×10^{-9}	2.7×10^6
2	A	セメント	1.1×10^{-1}	8.3×10^{-7}	1.3×10^5
3	A	粘土	1.1×10^{-2}	2.7×10^{-8}	4.1×10^5
4	A	セメント	5.6×10^{-3}	5.5×10^{-7}	1.0×10^4
5	A	粘土	8.2×10^{-3}	6.4×10^{-8}	1.3×10^5
6	A	セメント	5.4×10^{-2}	3.0×10^{-4}	1.8×10^2
7	B	粘土	20.6	2.6×10^{-5}	7.9×10^5
8	B	セメント	63.7	1.1×10^{-5}	5.8×10^6
9	B	粘土	46.3	4.5×10^{-5}	1.0×10^6
10	B	セメント	53.7	4.4×10^{-5}	1.2×10^6

(2) 注入材料の種類と透水係数

注入後のベントナイトとセメントの透水係数の関係をタイプAを図5.4-2に、タイプBを図5.4-3に示す。タイプAについては、セメントに比べてベントナイトの透水係数が2オーダーも小さいのに対して、タイプBについては若干セメントの方が小さな透水係数を示している。これは、タイプAの亀裂にはセメントが一応充填しているものの、所々に空隙が求められることより小さな亀裂の充填性に劣っており、反面タイプBのような大きな亀裂に対しては、セメントの結合性が良い効果を示していることによるものと思う。したがって、小さな亀裂にはベントナイトが、大きな亀裂にはセメントが有利であると考えられる。⁷⁾

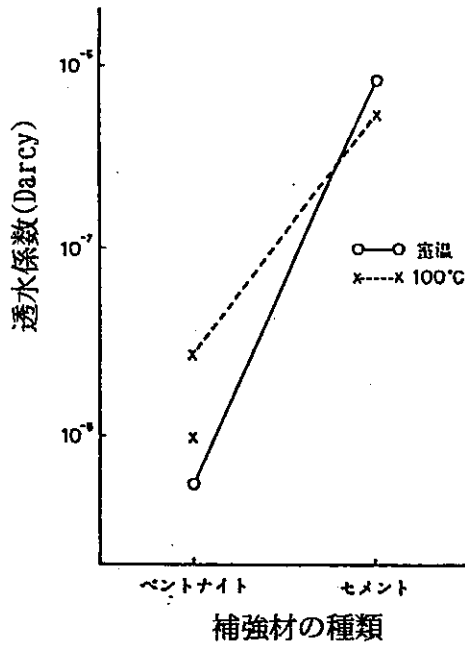


図5.4-2 補強材の種類と透水係数の関係 (タイプA)

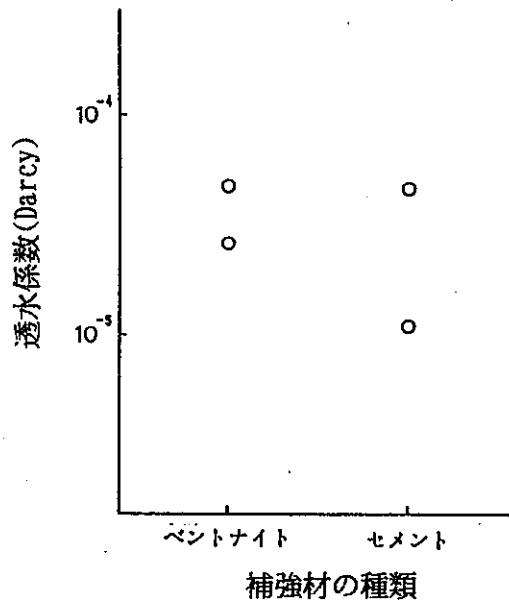


図5.4-3 補強材の種類と透水係数の関係 (タイプB)

(3) 注入圧力と透水係数

タイプAの試料の注入圧力と透水係数の関係を図5.4-4に示す。この図よりベントナイトの場合は、注入圧力が高いほど注入効果が高くなるのに対し、セメントの場合は有意な関係は認められない。これは、セメントがベントナイトに比べ小さな亀裂に入りにくく、亀裂の状態によって注入材の充填の度合いが異なってくるためと考える。⁷⁾

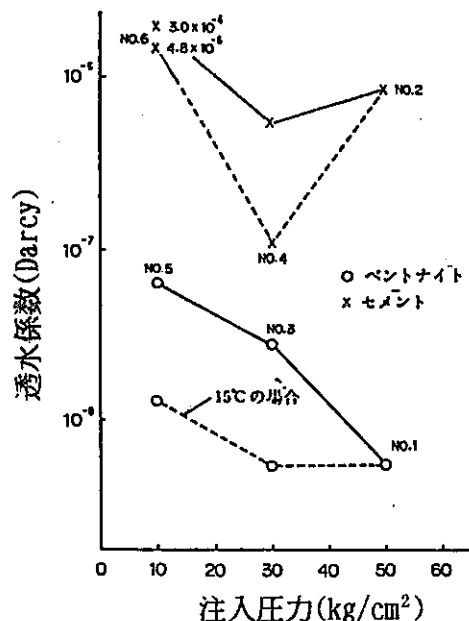


図5.4-4 注入圧力と透水性係数の関係

5.4.2 グラウトの止水性^{2) 3) 24)}

野外グラウト試験を、日本中部の花崗岩石切り場において地表下5m以内の単一割れ目を対象として2回実施した。1回目の試験は通常のグラウト法により実施し、合わせて事前調査法の検討を行った。2回目の試験では通常のグラウト法と超音波グラウト法を行い結果を比較した

材料については、1回目の試験には微粒子セメントと分散剤を混合したもの、2回目の試験には、コロイドセメントに粘土と分散剤を混合したものをを用いることとした。各セメント材の粒度分布比較を図5.4-5に、試験に使用したグラウト材の配合を表5.4-2に示す。グラウト試験場は、中～粗粒の雲母花崗岩である。1回目の試験では、石切り場の約15×25mの比較的平らな試験場について地表調査を行い、その結果図5.4-6に示すような地表における割れ目分布が明らかとなった。続いて調査用試錐を行い図5.4-7のような3次元割れ目分布が明らかとなった。

これによるとこの試験場には地表から2.3～5mのところに2本の水平な割れ目が存在する。これらの結果に基づき図5.4-6に示した場所を試験位置とし、この水平単一割れ目をグラウトの対象とした。

2回目の試験では、周辺が切り出された比較的平らな40m×20mの場所を試験場とし、周囲の断面と地表調査により2本の水平割れ目があることがわかった。図5.4-8に示す位置に試錐を行い、コア物性試験等を実施した。これらの調査の結果、図5.4-9のような割れ目分布が明らかとなり、地表下1.8m及び2.5m付近にある2本の水平割れ目をグラウトの対象とした。

試験装置としては、グラウト注入試験装置を図5.4-10に示す。これは2回目の試験用に開発したもので、1回目の試験に用いたものと基本的な装置の構成は同じであるが、少流量の試験が可能である。超音波グラウト装置は、この装置の注入位置（パッカー間）に超音波発振器を追加したものである。

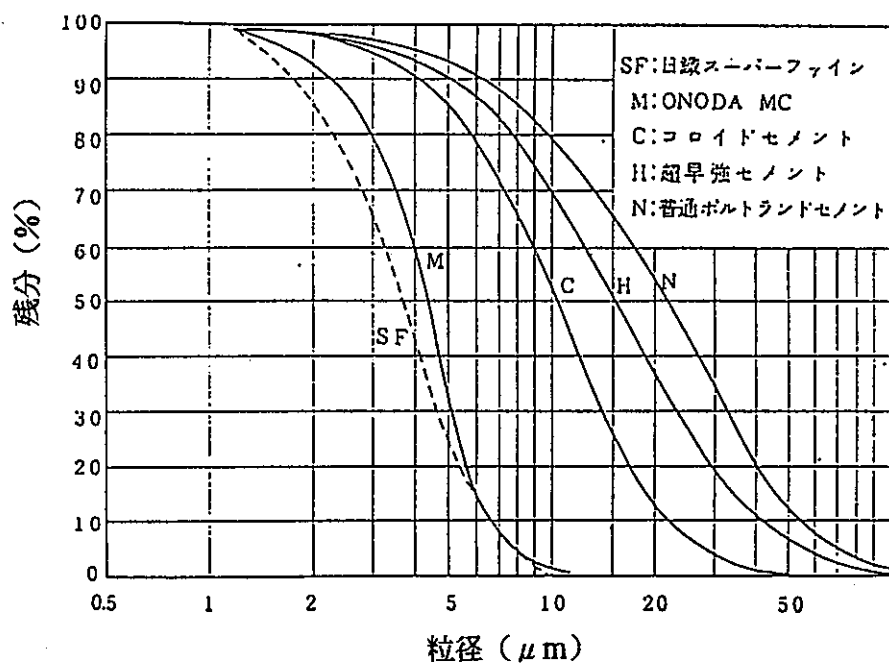


図5.4-5 セメント系材料粒度分布比較図

表5.4-2 注入材配合

〔第一回試験〕

配 合	水 (Kg)	S F (Kg)	(分散材) マイティ150R (cc)
500(%)	46.80	9.36	76
300(%)	44.90	14.96	121
100(%)	37.27	37.27	302

〔第二回試験〕

主 材	混和材	高性能減水剤	水
コロイドセメント	木面粘土	マイティ150R	(ℓ)
10kg	7kg	0.1kg	20

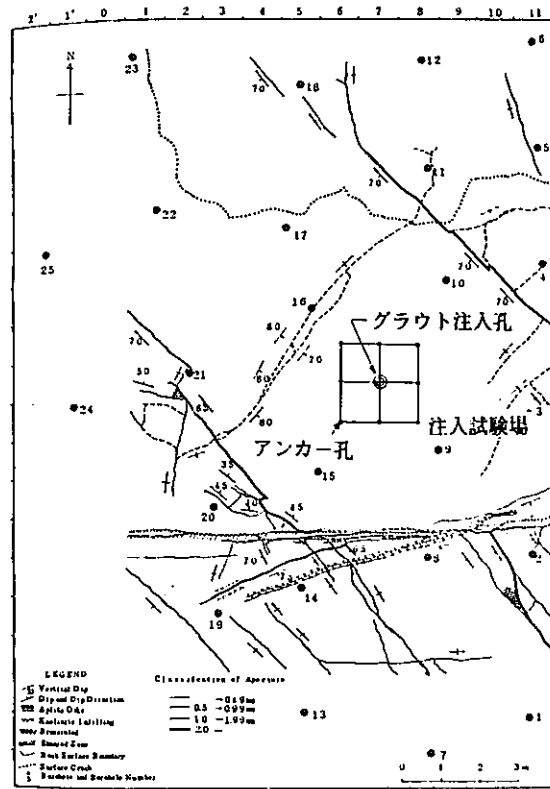


図5.4-6 第一回試験場平面図

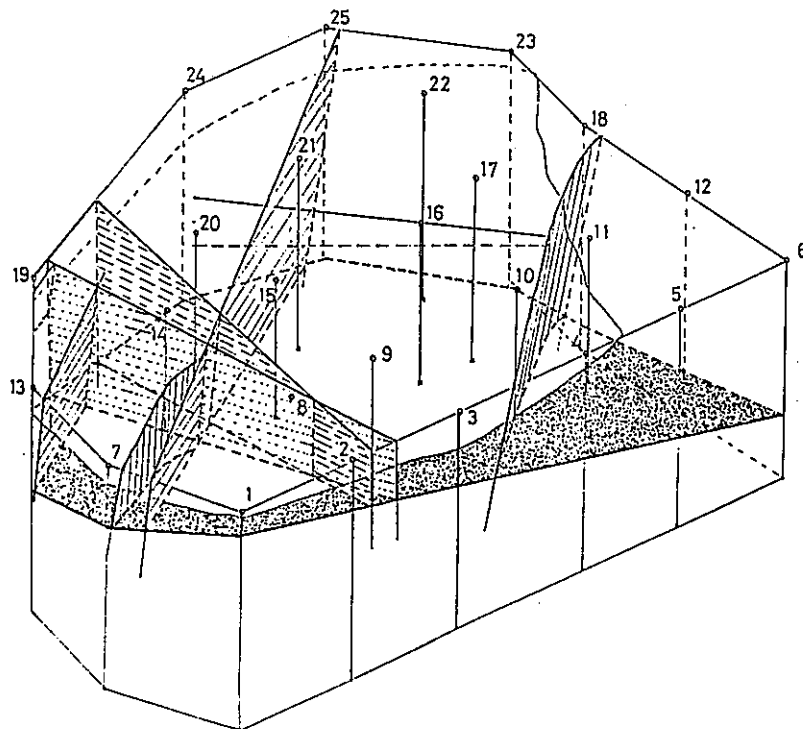


図5.4-7 第一回試験場三次元割れ目分布図

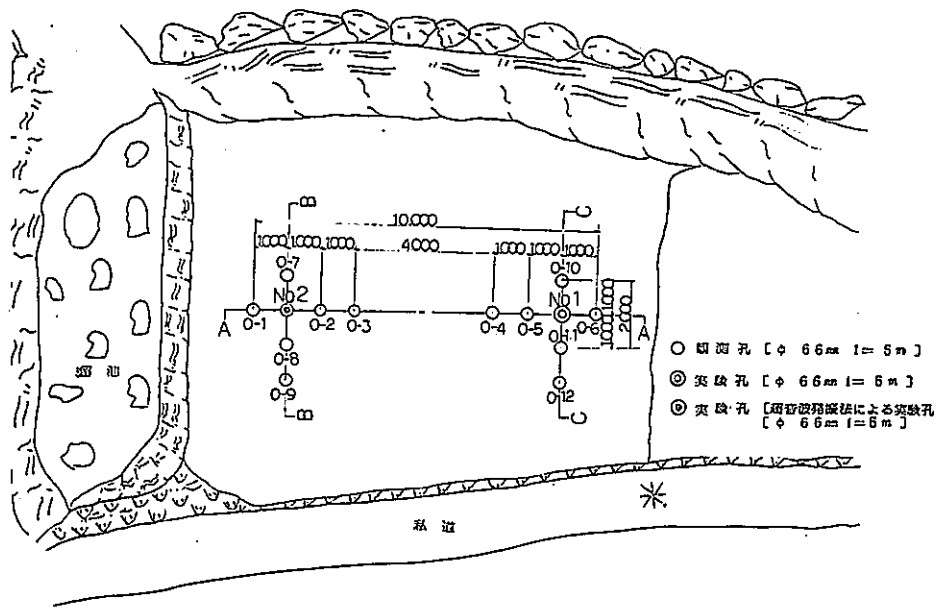


図5.4-8 第二回試験場平面図

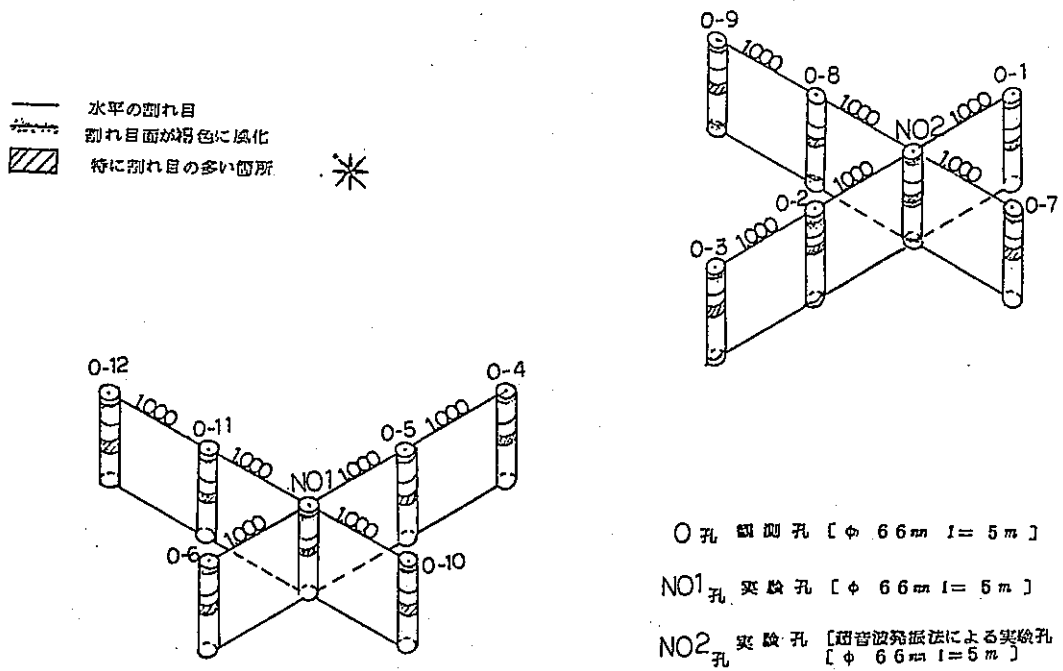


図5.4-9 第二回試験場割れ目分布図

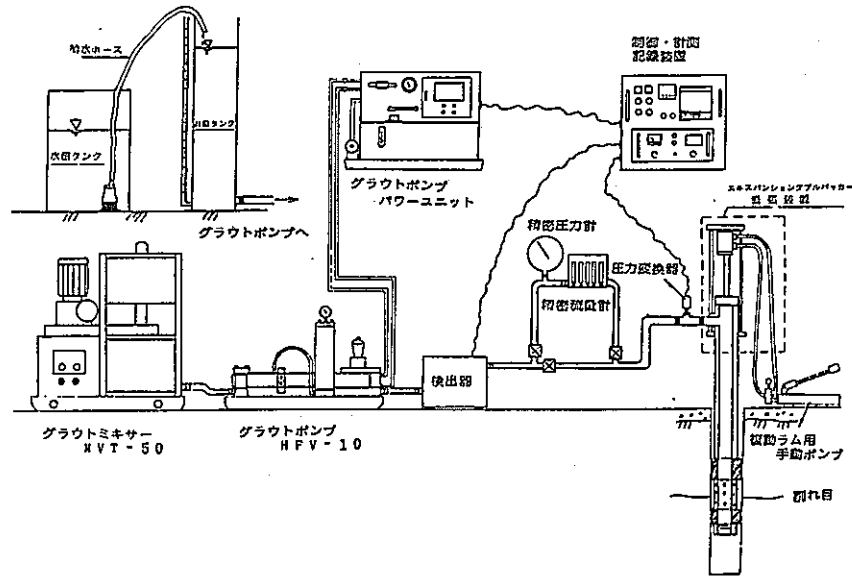


図5.4-10 試験装置システム図

(1) 試験方法

試験は先ず最初にグラウト対象割れ目への注水試験を行い、その透水性を測定、割れ目を推定した。次に所定の条件によるグラウト注入を実施し、2週間後注入孔をオーバーコアリングして再び注入試験を行い、透水性の変化を調べた。1回目の試験では、地下深部の応力状態を模擬するために試験周囲に8本のアンカー孔を設け、最大 32.2Kg/cm^2 の地中応力を発生させた。注入前の注水試験では、注水圧を 1Kg/cm^2 から 30Kg/cm^2 まで段階的に増加させ再び 1Kg/cm^2 まで段階的に減少させた。また、各圧力で 50l の水を注入し注水流量を測定した。水/セメント比500%のものから開始し注入圧力を $1 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 15 \rightarrow 19.9\text{Kg/cm}^2$ と段階的に増加させ、各圧力で10分間注入を継続した。この後、水/セメント比300%のものに切り換え 19.9Kg/cm^2 で30分間注入、最後に100%のものに切り換え、注入流量 0cc/分 が30分間継続した時点で終了した。注入後は注入孔とこれから 1m 離れた所に2孔試験錐を行い $1 \sim 25\text{Kg/cm}^2$ の注入で注入試験を実施し透水性を評価した。

2回目の試験では、図5.4-8のNo.1で通常のグラウト法、No.2で超音波グラウト法を行った。このときはアンカーは設けず自然の応力状態で行った。注入前の注水試験では注水圧を上部の割れ目では 1Kg/cm^2 から 10Kg/cm^2 まで、下部の割れ目では 0.2Kg/cm^2 から 0.7Kg/cm^2 まで段階的に増加させ、再び 1Kg/cm^2 及び 0.2Kg/cm^2 まで段階的に減少した。各圧力で上部の割れ目では20分間、下部の割れ目では10分間注水を継続し注水流量を測定した。グラウトの注入は、上部の割れ目については $5 \rightarrow 10\text{Kg/cm}^2$ 注入を段階的に増加し、 5Kg/cm^2 では20分間、他の圧力では30分間注入を継続した。注入後の注水試験では注入孔をオーバーコアリングし $5, 10, 15, 20\text{Kg/cm}^2$ の圧力で注水した。各圧力で20分間注入を継続し注入流量を測定した。

(2) 結果及び考察

1 回目の試験における注入前注水試験と注入後注水試験での注入流量と注入圧力の関係を図 5. 4 - 11 に示す。この結果から、不透水性岩盤中の平行平板割れ目を想定し、ダルシー則を適用した場合の次式より割れ目幅及び透水性を算出した。

$$b_0 = \left[\frac{6\mu}{\pi} \cdot \frac{Q}{\Delta P} \cdot \ln \frac{r_0}{r_i} \right]^{1/3}$$

$$K_f = \frac{\gamma}{12\mu} b_0^2$$

- b_0 : 平均割れ目幅 [L]
- μ : 粘性係数 [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$]
- r_0 : 影響半径 [L]
- r_i : ボアホール径 [L]
- Q : 注入流量 [$L^3 \cdot T^{-1}$]
- ΔP : 注入圧力 [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$]
- K_f : 割れ目の透水係数 [$L \cdot T^{-1}$]
- γ : 流体の重量密度 [$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}$]

注入孔における注入圧力 20Kg/cm^2 での平均割れ目幅及び割れ目の透水係数は、注入前が 0.0256mm と $5.3 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 、注入後が 0.0062mm と $3.15 \times 10^{-5} \text{m/s}$ となった。グラウト注入により割れ目幅は 24.2% に、透水係数は 5.9% に減少している。

グラウト注入後に注入孔から 1m の位置に 2 孔設けた試錐孔における注水試験によると、平均割れ目と割れ目の透水係数は各々の試錐孔において 0.01mm と $8.4 \times 10^{-5} \text{m/s}$ 及び 0.007mm と $4.2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ となった。これにより注入孔から約 1m の位置までグラウトの効果が及んでいると推定できる。2 回目の試験ではアンカー孔を設けなかったため、地中応力は自然状態である。注入前注水試験の結果から算出した平均割れ目幅及び割れ目の透水係数は、上部の割れ目では No. 1 孔（通常グラウト法を実施）で 0.073mm で $4.35 \times 10^{-3} \text{m/s}$ である。

下部の割れ目では、No. 1 孔で 0.251mm 、 $5.15 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 、No. 2 孔で 0.262mm で $5.61 \times 10^{-2} \text{m/s}$ である。注入後の注入試験では、いずれの場合も注入量 = 0 となり 1 回目の試験より良好なグラウトができたことがわかった。通常グラウト法と超音波グラウト法の効果の比較については、割れ目幅の狭い上部の割れ目について検討した。No. 1 孔と No. 2 孔での割れ目の幅の違いを補正してグラウト注入量を比較した。注入圧力 $5 \rightarrow 10 \rightarrow 15 \text{Kg/cm}^2$ において、超音波グラウト法による注入量の方が通常グラウト法による注入量より、各々 6.21 倍、 4.16 倍、 3.83 倍の注入量が得られた。割れ目幅は一様でないため、注入量の多さがそのままの良好なグラウトができたことを示しているとはいえないが、この差は有意と考えられる。

超音波グラウト法の効果を評価するために、花崗岩コアに人工的な平行平板割れ目を作り、室内グラウト試験を行った。この結果、超音波を加えると見掛けの剪断抵抗が、割れ目幅0.5mmの場合、48分の1に減少していることが分かった。また、グラウトを注入したコアの割れ目面における剪断強度を測定したところ、超音波を加えた場合が 5.2Kg/cm^2 、加えない場合が 4.2Kg/cm^2 となった。このことから付着力が1.24倍向上していると考えられる。

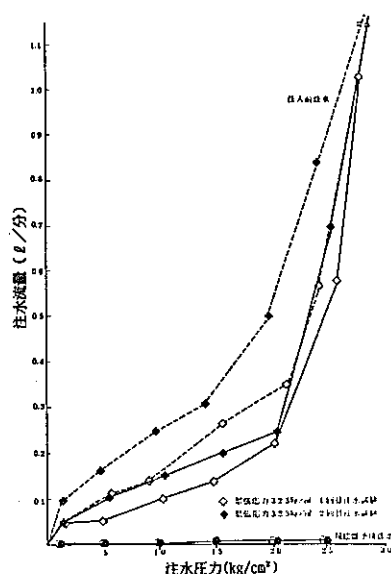


図5.4-11 第一回試験注入前後の注水試験結果

5.4.3 ピンホール試験^{3) 4)}

岩盤内に注入され、割れ目内で固結したグラウト材も長期的にはそのわずかな間隙を流れて地下水によってエロージョンやセメント材料の溶食が考えられる。ピンホール試験は、この現象を定性的に観察するためと、今後の試験方法を定める基礎データとするために実施した。ピンホール試験の特性値は浸透量で、変動因子及び水準はピンホール径(0.3, 0.5, 1.0mm)、水頭差(100, 300, 500, 700, 920cm)、試験水の水質(水道水、pH=3の酸性水)、試験期間(7, 50, 230日)である。

試験の結果から、グラウト固結体は、ある動水勾配以上になるとエロージョンが起きることが把握された。また、この現象は流速に左右されるはずであるが、結果からは流速のみに起因しているようではなく、ピンホール径と流速の間に何らかの相互作用があると推定される。

6. まとめ

これまでのシーリング研究によって、以下のような見通しが得られた。

(1) 埋め戻し

埋め戻し材料については、ベントナイトの有効性が確認された。

特に単一系よりは熱伝導性、力学的強度の改善という点で、さらには経済性という点においても複合系の適用が有効であると考えられる。

複合系とする場合の混合材としては、取得データも少なく種々の材料について今後多くのデータを取得していくことが必要である。

また、解析的検討においては、緩み領域の透水係数が同じでも埋め戻し材の透水係数が大きくなるにつれ水粒子の移動時間及び移動距離が長くなることから、埋め戻し部が直接的地下水移行経路とならないにしろ、材料の透水係数は小さい方が望ましい。

さらに、施工については現状の技術による実現可能性の見通しが得られた。

(2) プラグ

プラグ材料としては、セメント系、圧縮ベントナイト、現地発生材の適用が考えられるが、セメント系については材料の劣化の問題、圧縮ベントナイトについては強度の問題があり、現地発生材については未検討であるという状況である。

本材料の場合、材料を一つに絞り込むのではなく、設置環境条件及び要求機能に対応した、柔軟な材料の選択と組合せが必要である。

解析的検討については、プラグの地下水流動の抑制の有効性が見通しが得られた。

さらに現状技術による実現可能性の見通しも得られた。

(3) グラウト

グラウト材料については、セメント系、粘土系材料が候補として挙げられる。

亀裂の形態、大きさに対するグラウトの注入効果に係わる室内試験では、小さな亀裂にはベントナイトが、大きな亀裂にはセメントが有利であるとの結果が得られており、注入条件によって材料を柔軟に選択することも必要となってくると考えられる。

また、施工法については従来の注入工法に比して、超音波等を加えた動的注入工法の有効性が見通しが得られた。

今後は、これまでの基礎的研究をベースにシーリングシステムの性能評価を行うべく、定量的かつ詳細に現象を把握し、モデル開発、設計手法の開発、さらには施工技術の最適化を図っていくための研究開発を行っていくことが必要である。

特に現象の把握に当たっては、環境（水、熱、応力）、岩種（結晶質岩、堆積岩）、時間を考慮したメカニズムの理解によるモデル化、さらにモデルに適用するデータの取得が必要となる。

7. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたり貴重な御助言、御指導を戴いた、環境技術開発推進本部
処分研究グループ 大澤副主幹、河村主査に感謝の意を表します。

8. 参考文献

1. (株) 鹿島建設：高レベル廃棄物地層処分に係るグラウト技術の調査研究 (I)
PNC SJ 176 81-03(1981)
2. (株) 鹿島建設：高レベル廃棄物地層処分に係るグラウト技術の調査研究 (II)
PNC SJ 176 82-01(1982)
3. (株) 鹿島建設：工学バリアのためのグラウト技術の試験研究 (III)
PNC SJ 176 84- (1983)
4. (株) 鹿島建設：工学バリアのためのグラウト技術の試験研究 (IV)
PNC SJ 176 84-01(1984)
5. (株) 鹿島建設：人工バリアのためのシール及びプラグに関する研究
PNC SJ 176 85-01(1985)
6. (株) 鹿島建設：人工バリアのためのシール及びプラグに関する研究 (II)
PNC SJ 5110 86-001(1986)
7. (株) 鹿島建設：地層処分ににおける人工バリアの研究
PNC SJ 5110 (1987)
8. (株) 鹿島建設：処分場の閉鎖技術に関する調査・試験研究
PNC SJ 4100 88-001(1988)
9. 鹿島、大林、清水、大成：処分場の閉鎖技術に関する調査・試験研究 (II)
PNC SJ 4449 90-001(1989)
- 1 0. 鹿島、大林、清水、大成：地層処分ににおけるバックフィル候補材料に関する調査
PNC SJ 4449 90-008(1990)
- 1 1. 工業開発研究所：地層処分ににおける緩衝材に関する研究 (II)
PNC SJ 199 83-03(1983)
- 1 2. STRIPA PROJECT: "Final Report of the Borehole, Shaft, and Tunnel Sealing Test
Volume I :Borehole plugging", TR87-01(1987)
- 1 3. STRIPA PROJECT: "Final Report of the Borehole, Shaft, and Tunnel Sealing Test
Volume II:Shaft plugging", TR87-02(1987)
- 1 4. STRIPA PROJECT: "Rock Sealing Large Scale Field Test and Accessory
Investigations", TR88-04(1988)
- 1 5. STRIPA PROJECT: "Rock Sealing-Interim Report on the Rock Sealing
Project(Stage I)", TR88-11(1988)
- 1 6. Atkinson, Hearne: "An assessment of the long-term durability of concrete
in radioactive waste repository", AERE-R11465, Harwell, U. K(1984)
- 1 7. 清水、鹿島、大林、大成、間：処分場の建設に係る設計条件の整備及び設計手法の
選定、PNC SJ 4449 89-001(1989)
- 1 8. 鹿島、大成、大林、清水、間：地層処分システムの設計研究
PNC SJ 4449 90-002(1990)
- 1 9. IAEA: "Draft Report on SEALING OF UNDERGROUND REPOSITORIES FOR
RADIOACTIVE WASTE" (1987)

- 2 0. 原子力安全研究協会：ストリパ計画に関する調査研究（V）
PNC SJ4533 86-001(1986)
- 2 1. 原子力安全研究協会：ストリパ計画に関する調査研究（VI）
PNC SJ4533 87-001(1987)
- 2 2. 原子力安全研究協会：国際ストリパ計画に関する処分技術の評価研究
PNC SJ4533 88-002(1988)
- 2 3. 原子力安全研究協会：国際ストリパ計画に関する処分技術の評価研究（II）
PNC SJ4533 89-002(1989)
- 2 4. 山川、杉原、八尋、吉田：PNCにおける閉鎖技術開発と単一割れ目の野外グラウト
試験
- 2 5. 雨宮、柴田、塚根等：ベントナイトの基本特性調査, PNC SN8410 89-033(1989)
- 2 6. R. PUSCH: "FINAL REPORT OF THE BUFFER MASS TEST - Volume III ; Chemical and
physical stability of the buffer materials" NAGRA, TR85-60(1985)
- 2 7. 井上 厚行：粘土科学, 26, 247-262(1986)
- 2 8. 島田 俊介、兼松陽：最新の地盤注入工法 改訂版, 理工図書, (1979)
- 2 9. トンネルと地下注入講座編集委員会編, 最近の注入工法(1)~(15): トンネルと地下
Vol14 No.1 ~ Vol15 No.3(1983)
- 3 0. R. PUSCH: Highly compacted Na bentonite as buffer substance, KBS
- 3 1. 鹿島、大成、大林、清水、間：地層処分システムの設計研究（II）
PNC PJ1449 91-001(1991)