

# 釜石人工バリア試験の実施計画案

1995年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

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

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

1 9 9 5 年 1 月

## 釜石人工バリア試験の実施計画案

間野 正、石川 博久  
藤田 朝雄、杉田 裕

### 要 旨

地層処分における技術開発の観点からは、工学規模での試験によりニアフィールド環境である周辺岩盤の挙動が人工バリアに与える影響の把握および周辺岩盤を含むニアフィールド性能の定量的評価と室内および原位置における大型試験による人工バリアの品質性能の確認を行い、地層処分技術の信頼性向上を図ることが重要となっている。そのため、動燃東海の地層処分基盤研究施設等における工学規模の試験と並行して、釜石原位置試験場において、人工バリアの品質性能の確認およびその実岩盤条件下でのニアフィールド連成挙動を評価することが必要となっている。

一方、地層処分の研究開発の目標は、処分された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ることから、粘土系グラウトの遮蔽能力の把握は、ニアフィールド環境の性能評価の観点から重要な項目の一つとなっている。

粘土系グラウトはセメントグラウトに比べて、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。また、原位置における施工例も少ないことから、原位置における粘土系グラウト試験を実施し、亀裂の性状（主として亀裂幅）、施工条件（注入圧、濃度）とグラウトの基本特性（安定性、止水効果）との関係を確認することが必要となっている。

そこで、実条件でのニアフィールド環境を把握するため原位置における粘土膨張・熱負荷による緩み領域の影響評価および粘土系グラウトの原位置試験を実施することとし、試験計画案を策定した。

## 目 次

1. 緒言	1
1.1 はじめに	1
1.2 既往の研究	3
2. 試験計画	7
2.1 粘土充填・熱負荷試験	7
2.1.1 位置付け	7
2.1.2 目的	7
2.1.3 試験場所	7
2.1.4 試験方式	12
2.1.5 目的の確認手法	26
2.1.6 予備解析	29
2.1.7 実施内容	31
2.2 グラウト技術の適用試験	36
2.2.1 位置付け	36
2.2.2 目的	36
2.2.3 試験場所	36
2.2.4 目的の確認手法	36
2.2.5 実施内容	37
3. まとめ	40
参考文献	42
Appendix I	A-1
Appendix II	A-6

## 1. 緒言

### 1.1 はじめに

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

人工バリア周辺のニアフィールド環境では、ガラス固化体の発熱、周辺岩盤から緩衝材への地下水の浸入および緩衝材の浸潤による膨潤圧の発生、岩盤内の地下水流動および地圧の作用といった複数の現象が相互に作用する熱-水-応力連成現象がおこると考えられている。このようなニアフィールド環境における熱-水-応力連成現象を評価することは、再冠水時のニアフィールド環境条件の設定という観点からすると、重要な課題の一つになっている。

これまで人工バリアの熱-水-応力連成現象に関しては、模擬岩盤内に人工バリアを設置した室内試験<sup>27)</sup>や原位置に人工バリアを設置した試験<sup>7)</sup>例がある。室内試験では、動燃東海事業所の大型緩衝材試験設備（以下「Big-Ben」という。）において工学規模の熱-水-応力連成現象に関する試験<sup>27)</sup>があり、主に人工バリアの緩衝材の挙動に着目した試験を実施している。Selvaduraiの行った室内試験<sup>6)</sup>は、緩衝材中の熱の影響に観点をしぼっている。原位置試験の例ではSvensk Kämbränslehantering AB(以下「SKB」という。)の実施したバッファマスタテスト<sup>7)</sup>がある。バッファマスタテストは健全な天然の岩盤内に工学規模の人工バリアを設置したものであり、計測に関しては緩衝材に重点をおいている。釜石鉱山で実施された岩盤内充填粘土挙動試験（以下「粘土試験」という。）<sup>8)</sup>は、岩盤を含めた計測を実施するとともに原位置での施工技術に関する課題の抽出を行っている。

これらの試験は、いずれも人工バリアの熱-水-応力連成現象の把握に関する試験であるが、大型の試験では計測項目あるいは着目点が緩衝材に集中しており、岩盤に着目し

た試験は小型試験の例があるのみである。しかし、地層処分における技術開発の観点からは、ニアフィールド環境である周辺岩盤の挙動が人工バリアに与える影響の把握、周辺岩盤を含むニアフィールド性能の定量的評価および大型試験による人工バリアの品質性能の確認を行い、地層処分技術の信頼性向上を図ることが重要となっている。そのため、動燃東海の地層処分基盤研究施設等における室内試験（Big-Ben、COUPLE等）と並行して、釜石原位置試験場において、人工バリアの品質性能の確認およびその実岩盤条件下でのニアフィールド連成挙動を評価することが必要となっている。

そこで、実条件でのニアフィールド環境を把握するため原位置における粘土充填・熱負荷試験（以下「影響評価試験」という。）を実施することとし、試験計画を策定した。

影響評価試験では、以下の2項目を目的として実施する。

- (1) 人工バリアの施工方法とその品質は、人工バリアの定置方式やその規模、環境条件（湧水量や岩盤との接合部の条件）に依存する。人工バリアの定置方式やその規模、環境条件については、原位置で実規模のシステムを組んで確認すべき課題が多い。よって、原位置において実規模大の影響評価試験を行い施工性とその品質を確認する。これらを確認することにより、人工バリア性能の定量化のための実際的な条件の明確化、人工バリア技術の信頼性向上を図る。
- (2) 熱-水-応力の連成試験を実施し、人工バリアの設置初期の熱-水-応力連成挙動を観察し、連成モデルの妥当性を確認する。これらを確認することにより、長期の人工バリア挙動の予測の信頼性を高める。

一方、処分場建設時における空洞の掘削に伴う亀裂からの湧水や、力学的、水理学的ゆるみ域の発生に伴う地下水の卓越流路の形成は、地下空間利用等の面からしばしばグラウト等による止水対策が要求されている。

地層処分におけるグラウト施工では、地層の有する本来の地質環境を極力乱さないようにする観点から、セメント等を避けて粘土系材料を使用せざるを得ない場合が考えられる。固形化しない粘土系グラウトは、主として亀裂等のめづまり効果を期待するものであるが、その止水効果、安定性、改良範囲の評価が重要となる。グラウトの施工技術に関しては、ダム建設<sup>9)10)11)</sup>で地盤改良の目的で実施されるのが主であり、材料はセメントグラウトである。地層処分システムで適切な材料として考えられている粘土系グラウトに関しては、石油地下備蓄<sup>12)</sup>等での施工実績等その適応例は極めて少ない。

地層処分の研究開発の目標は、処分された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ることから、粘土系グラウトの遮蔽能力の把握は、ニアフィールド環境の性能評価の観点から重要な項目の一つとなっている。

粘土系グラウトはセメントグラウトに比べて、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。また、原位置における施工例も少ないことから、原位置における粘土系グラウト試験を実施し、亀裂の性状（主として亀裂幅）、施工条件（注入圧、濃度）とグラウトの基本特性（安定性、止水効果、改良範囲）との関係を確認することが必要となっている。

そこで、粘土系グラウトの原位置試験を実施することとし、試験計画を策定した。

グラウト試験は、以下の2項目を目的として実施する。

- (1) グラウトの基本性能は、亀裂の性状、注入圧、濃度等に依存するため、釜石原位置試験場において、それらをパラメータとした割れ目帯のグラウト技術の適用試験を実施し、実岩盤条件下での粘土系グラウトの基本性能を把握する。
- (2) これより、実際的な条件の明確化等、シーリング概念の詳細化を図る。

以上の観点から、割れ目帯の密封技術の適用性評価のため、(1)粘土充填・熱負荷試験、(2)グラウト技術の適用試験を行い人工バリアへの地下水の浸入を抑制する周辺岩盤の緩み領域の特性変化や割れ目帯のグラウト効果の確認を実施し、グラウト技術を確立することとし、2つの試験を実施するため、計測坑道及びピットを掘削し、ピット内に粘土を充填して加熱試験を行う。このときの周辺岩盤から充填粘土中への地下水の浸入挙動を観察し、熱-水-応力連成モデルの確証を行う。また、周辺岩盤の割れ目帯にグラウトを施工し、グラウト効果とその安定性を調べる。

本試験は、釜石原位置試験の第2フェーズの中で実施されることから、平成9年度に試験を終了する。

なお本報は、平成6年10月時点の計画案をとりまとめたものである。

## 1.2 既往の研究

人工バリアにおける熱-水-応力連成現象に関する研究は、室内試験に関しては動燃東海事業所におけるBig-Benでの熱-水-応力連成試験<sup>2)</sup>やSelvaduraiが実施した加熱試験<sup>6)</sup>等があり、原位置試験ではSKBのバッファマステスト（ストリッププロジェクト）<sup>7)</sup>の研究や釜石原位置試験場における粘土試験<sup>8)</sup>等が挙げられる。

Big-Benでは、人工岩盤内に緩衝材およびヒーターを設置し、緩衝材の挙動に着目した熱-水-応力連成現象に関する試験を行っている。加熱試験、加熱・部分注水試験、加熱・全面注水試験の3条件の試験を行い、オーバーバック、緩衝材内の温度分布や緩衝材内の温度勾配による水分分布の再配分、膨潤応力の発生状況等のデータが得られた。緩衝材の施工に関してはブロック方式と現地締固め方式の2方法を行い、おのこの施

工技術の確認を行っている。全面注水試験の試験結果(図-1~6)から、温度はヒーターを中心にほぼ同心円状に分布した。含水比は、ヒーター近傍では初期含水比より値が小さくなり、人工岩盤との境界では、試験開始後10日目からほぼ25%の一定値で推移した。膨潤応力は、最深部で10前後にピークが見られるが、他の地点では徐々に値が上昇した。

SKBのバッファマスタテストは地下環境において実施された試験である。試験の結果、温度分布、浸潤状況、膨潤圧等のデータの取得に加え、緩衝材ブロック間や施工時に見られた空隙は、供給された地下水によって膨潤したベントナイトによって閉鎖されることからベントナイトの自己シール性が確認された。

Selvaduraiの試験は、人工岩盤内にヒーターと緩衝材を組み込んだものである。この試験では、緩衝材内の変化に着目し、ヒーターの加熱による温度分布および含水率の分布を測定している。試験の結果、温度分布ではヒーターの中心部分が最も高い温度を示し、ヒーター熱はトータルの試験期間で緩衝材の水分を35%程度取り除くことを示している。この結果、緩衝材には熱収縮による亀裂の発生が多数確認され、開口幅は最大8mmにも及ぶことが示された。

粘土試験では、卓越した単一割れ目内に小型の人工バリアを設置し、地下水の供給に伴う緩衝材内の浸潤過程・膨潤圧の発生および加熱に伴うその変化を計測するとともに、周辺岩盤の変形および熱分布を計測している。この試験では、計測データのほか人工バリア設置に関わる問題点を種々抽出している。

グラウトの技術開発に関しては、土木の分野においてこれまで主流に行われてきたセメント材料によるグラウトの例<sup>9)10)11)</sup>がある。グラウトの施工は、軟弱地盤を対象とした建築物の施工時の地盤改良が主な目的である。ダム建設時にダムの基礎地盤となる岩盤にグラウトを多数施工し、その地盤を改良する工法は、カーテングラウトといわれ、代表的なグラウトの施工方法の一例である。これらセメントグラウトの施工に求められる性能は、注入時の圧力、粘性、固結時間、固結強度等<sup>9)10)</sup>である。

一方、粘土材料を対象としたグラウトの施工はあまり例がない。国内の代表的な施工例に久慈の地下石油備蓄基地<sup>12)</sup>がある。この地下石油備蓄基地は、地下深部約60mの地点に円柱状に掘削した10本の空洞からなる。地下水面下に空洞を掘削した場合、その空洞に向けて地下水の浸透が始まる。ここで、その浸透流の上流側に微細な粘土粒子を流し込むことによって、地下水の浸透経路となる岩盤内の亀裂、空隙を緩やかに広範囲に目詰まりさせて湧水量を低減させたり地下水位の低下を防止することが可能である。久慈の地下石油備蓄基地では、このような性質を利用したグラウト工法として、目的とする空洞の上部にグラウト注入用の空洞(水封トンネルおよび水封ボーリング)を先行して掘削し、粘土グラウトを注入しながら目的とする空洞を掘削した。これより、



地下水が空洞に流れ込む間に徐々に目詰まり効果が進行した。この工法では、空洞の極近傍だけでなく、広範囲な改良を行うことが可能であった。

以上が人工バリアの熱-水-応力連成現象およびグラウトに関する既往の研究である。

大型緩衝材試験における計測値<sup>2)5)</sup>

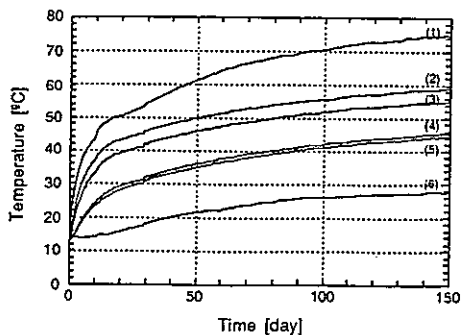


図-1 温度の経時変化

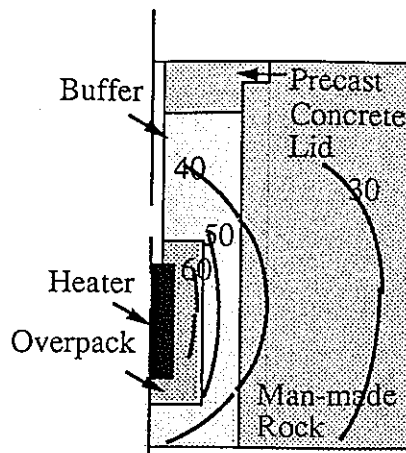


図-2 温度カウンター (5ヶ月)

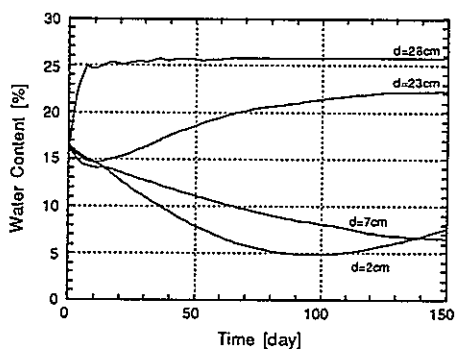


図-3 含水比の経時変化

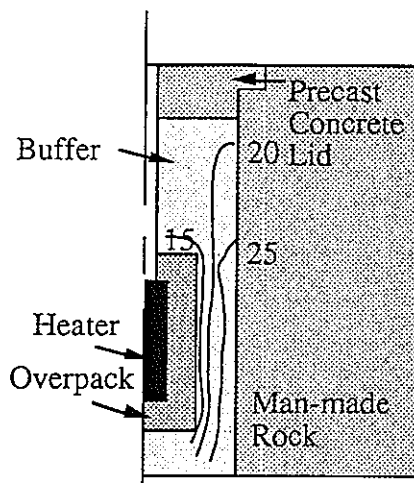


図-4 含水比カウンター (5ヶ月)

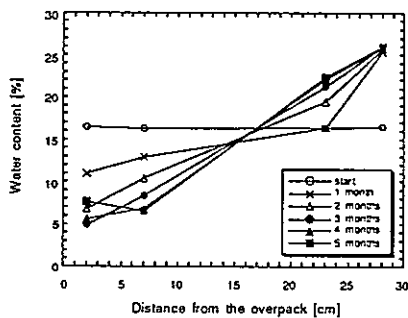


図-5 緩衝材中の含水比分布

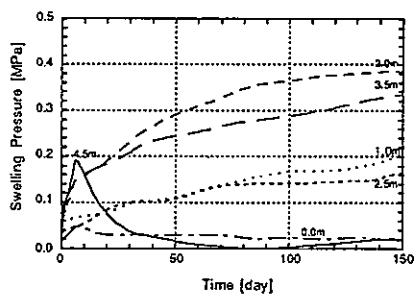


図-6 膨潤圧の経時変化

## 2. 試験計画

### 2.1 粘土充填・熱負荷試験

#### 2.1.1 位置付け

地層処分研究開発の第一次とりまとめにおいては、多重バリアシステム性能の概括的評価と、実験室基礎試験データに基づいた人工バリア仕様の概念検討を行った。第二次とりまとめでは、周辺岩盤を含むニアフィールド性能の定量的評価と室内および原位置における大型試験による人工バリアの品質性能の確認を行い、地層処分技術の信頼性向上を図ることが重要である。そのため、地層処分基盤研究施設等における工学規模の試験と並行して、釜石原位置試験場において、人工バリアの品質性能の確認およびその実岩盤条件下でのニアフィールド連成挙動を評価する。

#### 2.1.2 目的

- (1) 人工バリアの施工方法とその品質は、人工バリアの定置方式やその規模、環境条件（湧水量や岩盤との接合部の条件）に依存する。人工バリアの定置方式やその規模、環境条件については、原位置で実規模のシステムを組んで確認すべき課題が多い。よって、原位置において実規模大の人工バリア試験を行い施工性とその品質を確認する。これらを確認することにより、人工バリア性能の定量化のための実際的な条件の明確化、人工バリア技術の信頼性向上を図る。
- (2) 熱-水-応力の連成試験を実施し、人工バリアの設置初期の熱-水-応力連成挙動を観察し、連成モデルの妥当性を確認する。これらを確認することにより、長期の人工バリア挙動の予測の信頼性を高める。

#### 2.1.3 試験場所

釜石原位置試験場550mレベル坑道(図-7)における試験場所の選定に当り、

- (1) 他のTASKへの影響。
- (2) 地下水の有無。
- (3) 岩盤不連続面の影響。
- (4) 試験孔削孔及び機器搬入の影響。

等について現地調査および検討を行った。

検討の結果、最も重要な項目と考えられる他のTASKへの影響は、試験作業に関しては作業工程をTASK間で調整し、水理場への影響影響に関しては配置設計を考慮することで対処することが可能である。地下水の有無について、LABROCK用岩体採取近傍は湧水箇所が存在し、掘削後の湧水が期待できる。不連続面の影響については、

低角度の不連続面が望ましいが、高角度の不連続面に関しても対処可能である。試験孔削孔及び機器搬入の影響に関しては、試験孔の掘削についてはある程度の不連続面が存在するため、コアの取り出しは容易であると考えられ、掘削機器等については坑道の大きさにあわせた機器の設計で対応可能である。また、ずり処理の場所確保等についても充分余裕があり、LABROCK用岩体採取近傍は既に幅3.6m×高さ3m×長さ4mの空間が掘削されていることから掘削量の低減になる。これら検討項目の一覧を表-1に示す。

以上の結果から図-8、9に示すように試験場所をLABROCK岩体採取付近とした。

表-1 試験位置場所の調査結果

項目	考慮事項	重要度	現地調査の結果
他のTaskへの影響	作業工程について調整可能なこと。	A	TASK3-2もH6年度より掘削を行うことから、掘削作業上KD-88よりも深部の方が良い。
	坑道掘削に伴う水理場の変化が起きないこと。	A	LABROCK用岩体採取時のKD-90坑道周りの間隙水圧の変化は不明。
地下水の有無	グラウト効果を確認する観点から湧水が認められる。	B	LABROCK用岩体採取近傍で湧水箇所が存在し、壁面も濡れており、掘削後の湧水は期待できる。
不連続面の影響	試験領域、主に水路を把握するため、低角度の湧水不連続面が分布している。	C	LABROCK用岩体採取近傍には低角度の不連続面は認められない。
試験孔削孔および機器搬入の影響	試験孔削孔後のコアの取り出しが容易である。	C	割れ目がある程度存在するため、試験孔削孔後のコアの取り出しには問題は無い。
	機器搬入が可能であること。	B	試験孔削孔機器の分解により搬入可能。
その他			掘削ずり処理には休息所付近が利用可能。
			LABROCK用岩体採取近傍には幅3.6m×高さ3m×長さ4m空間が既に掘削されており、掘削量の低減になる。

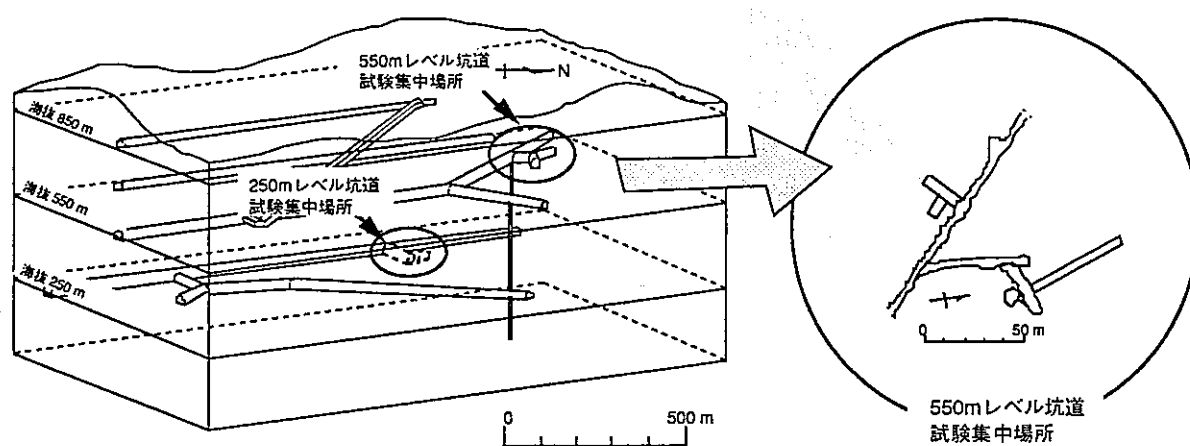


図-7 釜石鉾山における調査・試験位置図

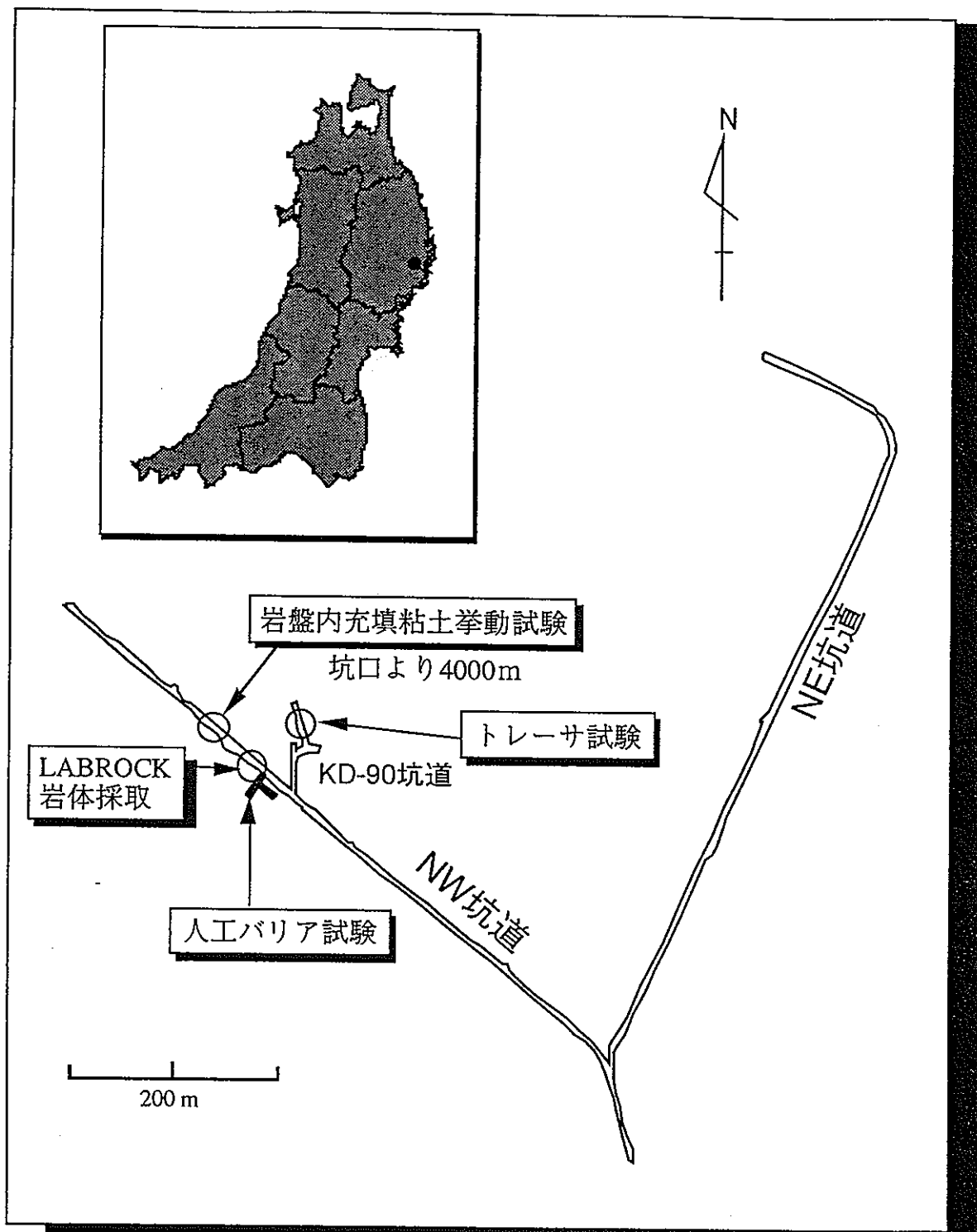


図-8 550mレベル坑道試験集中場所

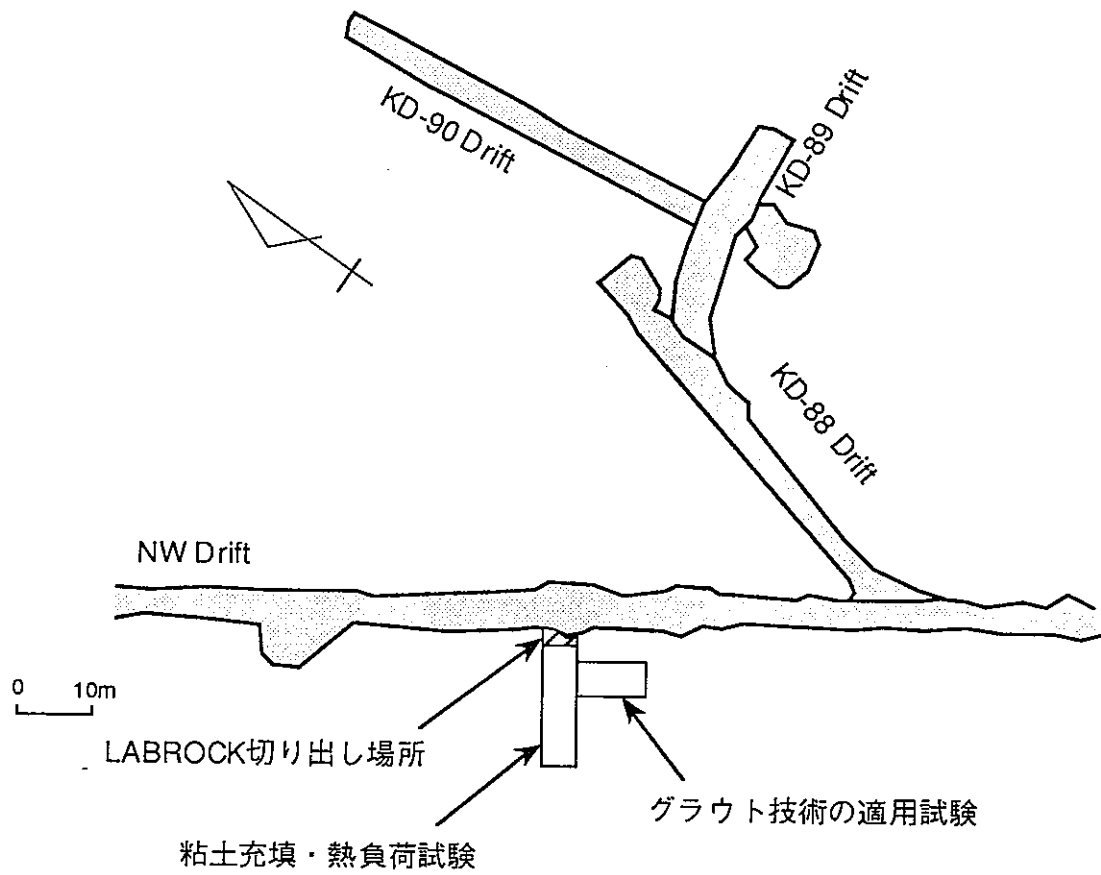


図-9 試験実施場所

#### 2.1.4 試験方式

地層処分研究開発の第一次とりまとめにおいては、人工バリアの定置方式として処分孔縦置方式と坑道横置方式の2案を代表例として、規模、掘削工法、緩衝材の施工方法についての検討を行った。釜石原位置試験場で試験を行う場合、試験期間および予算が限られていることから、いずれかの方式を基本方式とし、他方を予備方式として設定することとした。以下に両方式についての検討を示す(表-2~9)。

##### (1) 岩盤の掘削工法(表-2、3)

岩盤の掘削工法の選定に当たっては、第一次とりまとめで示されている工法の確認、岩盤の力学的、熱的影響を評価するため掘削による岩盤への影響を極力避けること、原位置試験規模等の観点から検討を行った(表-2、3)。

処分孔縦置方式の場合、第一次とりまとめで示されている大口径岩盤掘削機法、比較的掘削による岩盤への影響が少ないラインドリリング法が現実的であり、岩盤の試験掘削による検討で対応可能である。

坑道横置方式の場合、第一次とりまとめで示されているTBMは費用が高く、今回のような延長の短いトンネルの施工の場合には適切ではない。掘削による岩盤への影響をなるべく避ける観点より、ラインドリリング法が適切である。ただし、掘削壁面の仕上りの点で機械掘削工法に劣ることが予想される。

##### (2) 緩衝材の施工方法(表-4、5、8、9)

緩衝材の施工方法については、大型プレス機を用いてあらかじめベントナイトの圧縮成形体を製作し設置する方法(ブロック方式)と現場でベントナイトの粉末をタンパーで直接締め固める方法(現場締め固め方式)がある。これまでにBig-Benにおいて両方式による施工性の確認を実施している。緩衝材の品質確認(密度、均一性等)の観点からするとブロック方式は、ブロックの製作方法に大きく依存するため、原位置で行うメリットは少ない。現場締め固め方式は、施工性や品質に関して現地で確認すべき課題が多いことから、今回は、現場締め固め方式を基本として、その施工性と品質確認(密度、均一性等)を行うこととした。

処分孔縦置方式については現在試験を行っているBig-Benで実績があり人力、ベルコンによるまき出し、電動ランマーを用いて締め固める方法、型枠箱抜きによる方法で施工可能である。

坑道横置方式については吹付機による緩衝材の投入、転圧板を用いて動的に締め固める方法が挙げられる。処分孔縦置方式のように施工実績がないため、小規模の予備試験を実施した。その結果、吹付機を用いた場合緩衝材の乾燥密度は $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であり、さらに締め固めた場合 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であった(表-9)。しかしながら、試験中吹付機のパイプの詰りが発生し、実際に大量のベントナイトを用いる場合には、新た



な吹付機の開発が必要となる。また原位置で対応可能な締固め機械の開発および大規模な予備試験も必要となる。

(3) 湧水対策、均一浸潤工(表-6、7)

岩盤掘削に伴う地下水の湧水を防ぐために止水対策を行う。処分孔豎置方式、坑道横置方式いずれの場合でも試錐孔を掘削した排水工法で対応可能である。また、均一浸潤工に関しても、両方式に差異はなく対応可能である。

(4) 連成試験(表-8)

緩衝材の膨潤、熱負荷が周辺岩盤に及ぼす影響や緩衝材と岩盤との接合部の伝熱特性等を中心にニアフィールドの熱-水-応力連成現象の観察を行うとともに、連成モデルの適用性を検証する。坑道横置方式の方が緩衝材厚さが厚いため水の浸潤に時間を要することが予想されるが、もし処分孔豎置方式、坑道横置方式いずれの場合でも差異なく緩衝材の品質が得られるならば、連成モデルの適用性の検証データとしての差異はない。

以上、岩盤の掘削工法における経済性、緩衝材の施工方法における施工実績からくる確実性の観点から基本方式を処分孔豎置方式(図-10、11)、予備方式を坑道横置方式試験と設定することとし、以降基本方式についてのみの試験計画を示す。

表-2 豎置方式人工バリア試験における問題点と対策について (1)

工程	施工方法		概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安	
試験孔掘削	機械掘削工法	大口径岩盤掘削機	全断面ボーリング	掘削機にローラービットを取付けて、圧力70t掘削を行う。底盤部は平滑に仕上がる。	・ビット製作のコスト ・機械寸法 ・全断面を一度に掘削できないので掘削に時間を要する	・削孔水による地下水環境への影響	・試験掘削による検討	△
		大口径コアボーリング	大口径のコアチューブを取付けたボーリングマシンによる掘削を行う。	・ボーリングマシンにより外周部を掘削した後の、底盤部の削岩方法及びずり出し方法 ・実績はφ1mまで	・底盤部の仕上精度 ・1回当りの掘進長 ・削孔水による地下水環境への影響	・試験掘削による検討 ・他の削孔方法*の併用	△	
		ラインドリリング	小口径(100mm程度)を重ね合わせて多数穿孔し、掘削を行う。	・孔列の平行度が効果に大きく影響する。 ・ボーリングマシンにより外周部を掘削した後の、底盤部の削岩方法及びずり出し方法 ・コスト、スピードに問題	・底盤部の仕上精度 ・1回当りの掘進長 ・削孔水による地下水環境への影響	・試験掘削による検討 ・他の削孔方法*の併用	△	
	無発破工法(削岩工法)	アブレイシブジェット工法(ウォータージェット工法)	高圧噴流水とともに研磨材をノズルから拘束で噴射させることにより、岩石を切削する工法。発破及び他の削岩工法との併用。	・外周部を掘削した後の、底盤部の削岩方法及びずり出し方法 ・コスト、スピードに問題	・掘削面とノズル先端とを一定に保つ技術の開発 ・施工スピードの向上 ・削孔水による地下水環境への影響	・削孔装置の製作 ・原位性能確認試験 ・他の削孔方法*の併用	△	
	発破工法	プレスブリッティング	孔数を増やして、弱装薬で発破することにより、連続した破壊面を予め造成して、外部の影響を低減しようとする工法。	・孔列の配置、平行度、爆薬の種類が孔群状況に大きく影響する。 ・発破後の底盤部の削岩方法及びずり出し方法	・底盤部の仕上精度 ・サイトごとの振動特性の確認 ・空孔も配置した削孔パターンの決定	・試験発破による検討 ・他の掘削方法*の併用	×	

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能  
 △：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある  
 ×：何らかの問題で適用不可能  
 \*：下記参照

併用する掘削方法

施工方法	概要
発破工法による削岩	小割り発破により削石する。
静的破壊剤による削岩	孔内に水と生石灰系膨潤性の混合物を充填し、その膨潤圧によりひび割れを発生させるもの。仕上がり精度向上、周辺岩盤への損傷小。
袖圧クサビによる削岩	孔の内にクサビを打ち込んで、岩石を削石する工法。
液圧膨張による削岩	穿孔内にチューブを挿入し、これに高圧水(高圧の袖)を送って、チューブを膨張、加圧させ削石する。小型、軽量。

表-3 横置方式人工バリア試験における問題点と対策について (1)

工程	施工方法	概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安	
試験坑道の掘削	発破工法	ラインドリリング	掘削面沿いに孔間隔を密に穿孔し、人工的に破断面を形成し、仕上げ面からおくくの岩盤に出きるだけ応力を伝えないようにする方法。	・孔列の平行度が効果に大きく影響する。	・サイトごとの振動特性の評価	・試験発破による検討 (計測坑道掘削時に実施可能)	○
		プレスブリッキング	孔間隔を若干大きくして孔数を少なくし、装薬、発破することにより、連続した破断面を予め造成して、外部への影響を低減しようとする工法。	・孔列の配置、平行度、装薬の種類が効果に大きく影響する。	・サイトごとの振動特性の評価	・試験発破による検討 (計測坑道掘削時に実施可能)	○
		スムーズ ブラスティング	プレスブリッキングとは逆に、主掘削発破の最終段で周辺孔の発破を行い、平滑な壁面を作成しようとする工法。	・ゆるみ、振動の低減効果は小	・サイトごとの振動特性の評価	・試験発破による検討 (計測坑道掘削時に実施可能)	○
	無発破工法 (削岩工法)	アブレイシブジェット工法 (ウォータージェット工法)	高圧噴流水とともに研磨材をノズルから拘束で噴射させることにより、岩石を切削する工法。発破及び他の削岩工法との併用。	・単独でのトンネル掘削の実績はない ・コスト、スピードに問題	・不陸のある掘削面とノズル先端と一定に保つ技術の開発 ・施工スピードの向上	・小断面用装置の製作 ・他の削孔方法の併用 ・原位置確認試験	△
		静的破砕剤による削岩	穿孔内に水と生石灰系膨潤性の混合物を充填し、その膨潤圧によりひび割れを発生させるもの。仕上がり精度向上、周辺岩盤への損傷小。	・膨脹性発現に時間がかかる ・コスト、スピードに問題	・施工スピードの向上	・他の削孔方法の併用 ・試験施工による検討	△
		袖圧クサビによる削岩	孔の内にクサビを打ち込んで、岩石を割石する工法。	・ベスマシンが大型のため当試験では掘削不可 ・通常、外周孔の削岩が困難 ・コスト、スピードに問題	・小型機械の開発 ・施工スピードの向上	・他の削孔方法の併用 ・原位置予備試験	×
		液圧膨張による削岩	孔内にチューブを挿入し、これに高圧水(高圧の油)を送って、チューブを膨張、加圧させ削岩する。小型、軽量。	・孔尻の破砕が困難。チューブが破損しやすい ・コスト、スピードに問題	・施工スピードの向上	・他の削孔方法の併用 ・試験施工による検討	△
		大口径、高密度穿孔工法	大口径の孔を高密度に穿孔することにより切羽全体を掘削する工法。	・ベスマシンが大型のため当試験では掘削不可 ・コスト、スピードに問題	・小型機械の開発 ・施工スピードの向上	・他の削孔方法の併用 ・原位置予備試験	×
		連続孔穿孔工法	打撃式ドリルにより連続孔を穿孔する方法。	・ベスマシンが大型のため当試験では掘削不可 ・コスト、スピードに問題	・小型機械の開発 ・施工スピードの向上	・他の削孔方法の併用 ・原位置予備試験	×
		機械掘削工法 (単独機械掘削)	油圧ブレーカ	大型の油圧ブレーカを単独で用いて掘削する。	・当サイトの様な硬岩地山では掘削不能	・硬岩対応、小型高性能化	-
自由断面掘削機	ブームに取付けたカッタービットによって岩盤を掘削するもの。		・当サイトの様な硬岩地山では掘削不能	・硬岩対応、小型高性能化	-	×	
TBM	ディスクカッターを強力な推力で切羽に押し付けて回転させることにより、全断面を一気に掘削するもの。		・機械費が大のため、今回のように延長の短いトンネルには不向き。	-	-	×	

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能 △：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある ×：何らかの問題で適用不可能

表-4 豎置方式人工バリア試験における問題点と対策について (2)

工程	施工方法	概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安
緩衝材の投入	人力、ベルコンによるまき出し	事前に練り混ぜた緩衝材を人力、ベルコンによりまき出す方法	・ 湧水がある場合のまき出し作業	・ 湧水対策 ・ 緩衝材の練り混ぜ	・ 机上検討 ・ 緩衝材の水量調整	○
緩衝材の締固め	電動ランマーを用いて締固める方法	電動ランマーを用いて機器の自重と振動により、動的に締固める方法	・ 湧水がある場合、所要の乾燥密度が得られるか不明 ・ 締固め作業の効率性	・ 湧水対策 ・ 品質基準	・ 予備試験*による確認 ・ ランマーの高性能化	△
発熱体の設置	型枠箱抜きによる方法	型枠を設置、固定して、型枠周辺の緩衝材を締固めた後、型枠を撤去して発熱体を設置する方法 (Big Benに置ける実績)	・ 狭所部の締固め作業の効率性 ・ 発熱体周辺空隙部の処理	・ 湧水対策 ・ 均一湿润方法	・ ランマーの小型高性能化 ・ 机上検討	○
	削孔による方法	発熱体設置位置の上端まで緩衝材を施工した後、削孔して発熱体を設置する方法	・ 発熱体周辺空隙部の処理 ・ 削孔部周辺の緩衝材に悪影響を及ぼす可能性が大きい	-	・ 机上検討	×
	発熱体設置後に、周辺部の緩衝材を締固める方法	発熱体底面部または発熱体下部 (数10cm) まで緩衝材を締固めた後、発熱体を設置して、wその後、発熱体上部の緩衝材を締固める方法。	・ 狭所部の締固め作業の効率性 ・ 発熱体および埋設計器類の品質を損なわない緩衝材の締固め方法の検討	・ 湧水対策 ・ 均一湿润方法	・ ランマーの小型高性能化 ・ 机上検討	○

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能  
 △：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある  
 ×：何らかの問題で適用不可能  
 \*：下記参照

豎置方式による予備試験の要因および検討事項

工程	要因	検討事項
緩衝材の締固め	湧水量	締固め作業の可能性、乾燥密度、ばらつき、施工性
吹付け、締固め可能な湧水量を把握した後、湧水対策均一湿润について検討 (湧水対策と均一湿润の組み合わせ方法、施工方法、等)		

表-5 横置方式人工バリア試験における問題点と対策について (2)

工程	施工方法	概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安
緩衝材の投入	吹付け機による吹付け	事前に練り混ぜた緩衝材を吹付け機を用いて投入する方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>どの程度の湧水まで吹き付け作業が可能か不明(過去の実績なし)</li> <li>どの程度の乾燥密度が得られるか不明(配合により異なるが、過去の実績では乾燥密度1.3 g/cm<sup>3</sup>程度が上限)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水対策</li> <li>品質基準</li> </ul>	予備試験*による確認	△
	人力、ベルコンによるまき出し	事前に練り混ぜた緩衝材を人力、ベルコンによりまき出す方法	まき出した緩衝材が自立せず、締固め作業が複雑、困難となる	-	-	×
緩衝材の締固め	転圧板等を用いて動的に締固める方法(小型バックホー等)	小型バックホーに転圧板等の治具を取り付けて、動的に転圧して締固める方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>どの程度の湧水まで締固め作業が可能か不明</li> <li>所要の乾燥密度が得られるか不明</li> <li>機器類の作業足場</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水対策</li> <li>品質基準</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備試験*による確認</li> <li>机上検討</li> </ul>	△
	バイブレーターを用いて静的に締固める方法(小型バックホー等)	小型バックホーにバイブレーターを取り付けて、振動により静的に締固める方法				
発熱体の設置	型枠箱抜きによる方法	型枠(L=1m)をスライドさせながら型枠周辺の緩衝材を締固めていき、設置部の緩衝材を施工した後に発熱体を設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>型枠をスライドさせる際の緩衝材の自立性</li> <li>狭所部の締固め</li> <li>型枠の固定、スライド方法</li> <li>発熱体周辺空隙部の処理</li> <li>発熱体の設置方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>締固め方法</li> <li>湧水対策</li> <li>均一湿潤方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備試験*による確認</li> <li>机上検討</li> </ul>	×
		型枠(L=2m)を設置、固定して、型枠周辺の緩衝材を締固めた後、型枠を撤去して発熱体を設置する方法	<ul style="list-style-type: none"> <li>型枠をスライドさせる際の緩衝材の自立性</li> <li>狭所部の締固め</li> <li>型枠の固定、スライド方法</li> <li>発熱体周辺空隙部の処理</li> <li>発熱体の設置方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>締固め方法</li> <li>湧水対策</li> <li>均一湿潤方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備試験*による確認</li> <li>机上検討</li> </ul>	×
	削孔による方法	緩衝材(φ3m)施工後に設置部(φ1m)を削孔して発熱体を設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>削孔時の緩衝材の自立性</li> <li>発熱体周辺空隙部の処理</li> <li>発熱体の設置方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湧水対策</li> <li>均一湿潤方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備試験*による確認</li> <li>机上検討</li> </ul>	△
	緩衝材の投入と締固めと同時に行う方法	発熱体下部の緩衝材を締固めた後、必要に応じて削孔等の作業を行い、発熱体を設置して、その後、発熱体上部の緩衝材を締固める	<ul style="list-style-type: none"> <li>発熱体上部の狭所部の締固め</li> <li>発熱体の設置方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>締固め方法</li> <li>湧水対策</li> <li>均一湿潤方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>予備試験*による確認</li> <li>机上検討</li> </ul>	○

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能 △：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある ×：何らかの問題で適用不可能 \*：下記参照

\*予備試験における要因および検討事項

工程	要因	検討事項
緩衝材吹付け	圧送圧、ホース径、吹付け厚さ、吹付け角度、湧水の有無・量	吹付け作業の可能性、乾燥密度、自立性、出来形、はね返り率、ばらつき、施工性
緩衝材締固め	締固め方法、締固め回数・時間、湧水の有無・量	締固め作業の可能性、乾燥密度、自立性、出来形、ばらつき、施工性、計測機器の設置方法
発熱体の設置	型枠長さ、形状、設置方法、狭所部の締固め機器・方法、削孔機器・方法、隙間処理用充填機器・方法	施工性、乾燥密度、自立性、施工精度、計測機器の設置方法、発熱体周辺の隙間処理方法、発熱体の設置方法
吹付け、締固め可能な湧水量を把握した後、湧水対策、均一湿潤について検討(湧水対策と均一湿潤の組合せ方法、施工方法等)		

表-6 堅置方式人工バリア試験における問題点と対策について (3)

工程	施工方法		概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安	
湧水対策	注入工法	粘土系	周辺の亀裂部に、粘土系グラウトを充填して、粘土粒子の亀裂部への閉鎖作用により、止水を行う	・止水効果が定量的に確認されない	・止水性 ・湧水に対する安定性	・止水効果の確認試験を別途実施する必要がある	×	
		水ガラス系（無機系）	周辺の亀裂部に各種注入材料を充填し、注入剤の固化により止水を行う。	・強度が小さく、高水圧には不向きである		・水抜工法との併用	○	
		高分子系（ウレタン系）		・地下水汚染の可能性がある			×	
		セメント系		・緩衝材を変質させる可能性がある ・達成試験との両立性		・水抜工法との併用	×	
	排水工法	水抜ボーリング	・処分孔周辺のボーリング孔を用いて、強制的に排水を行い、処分孔内への湧水を減少させる。	・亀裂幅、ボーリング孔数等の環境条件によるが、完全には止水しにくい			・注入工法、張付工法との併用	○
		水抜き坑						
		凍結工法		液体窒素等を用いて、岩盤中の水を一時的に凍結させて透水を図る。	・流速の大きい場所には適用できない ・液体窒素の搬入が困難			△
	張付工法	薄板	処分孔及び坑道壁面の亀裂部に不透水板を張り付けて、排水を迂回させてポンプ等により排水する。	・板撤去後の緩衝材と岩盤との隙間処理 ・板を撤去しない場合には達成試験との両立性		・予備試験による施工性の確認 ・水抜き工法との併用 ・隙間処理方法の机上検討	△	
厚板								
均一浸透工	ジオテキスタイル		岩盤にロックボルトで張り付ける。	・伸縮性があり、近傍での締り締めや高水圧部での設置が困難	・湧水対策 ・発熱体の設置	・予備試験による確認	△	
	グリマット		グリマット中に砂を充填して設置する。	・局面への使用に対して、加工性に工夫が必要		・机上検討 ・メーカーによる試作	△	
	砂充填		緩衝材施工後に、湧水対策等で設置した板を撤去することにより、岩盤と緩衝材との間にできた隙間に砂を充填する。	・湧水による砂の流出		・机上検討	△	
	ガーネットポーラス板		板を設置する。	・加工性			×	

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能

△：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある

×：何らかの問題で適用不可能

表-7 横置方式人工バリア試験における問題点と対策について (3)

工程	施工方法		概要	問題点	関連する検討事項	対処方法	試験施工への適用性の目安	
湧水対策	注入工法	粘土系	周辺の亀裂部に、粘土系グラウトを充填して、粘土粒子の亀裂部への閉鎖作用により、止水を行う。	・止水効果が定量的に確認されない	・止水性 ・湧水に対する安定性	・止水効果の確認試験を別途実施する必要がある	×	
		水ガラス系（無機系）	周辺の亀裂部に各種注入材料を充填し、注入剤の固化により止水を行う。	・強度が小さく、高水圧には不向きである		・水抜工法との併用	○	
		高分子系（ウレタン系）		・地下水汚染の可能性がある			×	
		セメント系		・緩衝材を変質させる可能性がある ・速成試験との両立性		・水抜工法との併用	×	
	排水工法	水抜ボーリング	・処分孔周辺のボーリング孔を用いて、強制的に排水を行い、処分孔内への湧水を減少させる。	・亀裂幅、ボーリング孔数等の環境条件によるが、完全には止水しにくい			・注入工法、張付工法との併用	○
		水抜き坑						
	凍結工法		液体窒素等を用いて、岩盤中の水を一時的に凍結させて進水を固る。	・流速の大きい場所には適用できない ・液体窒素の搬入が困難				△
	張付工法	薄板	処分孔及び坑道壁面の亀裂部に不透水板を張り付けて、排水を迂回させてポンプ等により排水する。	・凸凹局面への張り付けに工夫が必要 ・板撤去後の緩衝材と岩盤との隙間処理 ・板を撤去しない場合には速成試験との両立性			・予備試験による施工性の確認 ・水抜き工法との併用 ・隙間処理方法の机上検討	△
		厚板						
	均一浸潤工	ジオテキスタイル		岩盤にロックボルトで張り付ける。	・伸縮性があり、近傍での締固めや高水圧部での設置が困難	・湧水対策 ・発熱体の設置	・予備試験による確認	△
グリマツト		グリマツト中に砂を充填して設置する。	・凸凹局面への使用に対して、加工性、設置性に鍵あり ・岩盤との隙間処理		・机上検討 ・メーカーによる試作	△		
砂充填		緩衝材施工後に、湧水対策等で設置した板を撤去することにより、岩盤と緩衝材との間にできた隙間に砂を充填する。	・湧水による砂の流出		・机上検討	△		
ガーネットポーラス板		板を設置する。	・加工性				×	

試験施工への適用性の目安 ○：現状技術で適用可能  
 △：予備試験等を行い適用性を判断する必要がある  
 ×：何らかの問題で適用不可能

表-8 横置方式と豎置方式における緩衝材の品質・施工に関する比較表（1）

	項目	内容		豎置方式	横置方式
基本計画	坑道	計測坑道		なし	W3m×H2m×L30m
		組立坑道		なし	W5m×H7m×L20m
		試験孔・坑道		W5m×H7m×L15m	φ3m×L20m
	緩衝材	大きさ		φ1.7m×H15m	φ3m×L10m
		体積		9.8m <sup>3</sup>	69.1m <sup>3</sup>
		配合		B/S=7/3（クニゲルV1）	
		目標乾燥密度		1.6g/cm <sup>3</sup> 程度（現地締固め方式）	
	発熱体	大きさ（材質）		φ1m×L2m（炭素鋼）	
	要求品質と望ましい仕様	止水性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト（透水係数と密度は比例）	
		自己シール性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト（膨潤圧力と密度は比例）	
		核種吸着遅延性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト	
		熱伝導率		均質、高密度のベントナイト。岩盤の方が熱伝導率が高いため、厚さはむしろ薄いほうがおーぼーぼの温度上昇を抑制できる。（熱伝導率と密度は比例）	
		化学的緩衝性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト	
		オーババック支持性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト（強度と密度は比例）	
応力緩衝性		均質、高密度、厚さの厚いベントナイト（強度と密度は比例）			
緩衝材の施工	準備工	緩衝材	工場内での事前混合のため均質材料である		乾式方式の場合は、現場配合のため、ある程度のばらつきは避けられない。
		作業足場	試験孔への出入足場が必要。		円形断面の場合、作業足場が必要。
	緩衝材の投入	方法	人力によるまき出し→まき出し厚の微調整が可能であるが、作業が非効率的である。		機械による吹付け→作業が効率的であるが、細かい調整に難がある。
		投入量の管理	袋数により正確な投入量の管理が行える。		吹付け機械を使用するため、豎置方式に比べ正確な把握ができない。
	締固め	仕様機器	電動ランマー（微調整が可能） ランマーの小型高性能化が必要		転圧板付き小型バックホー（微調整に難） 転圧板形状の検討、締固め機器・方法を開発する必要が
		締固め方向	鉛直		水平
		締固め面積	MAX：2.27m <sup>2</sup> /層（狭所作業となる）		MAX：7.1m <sup>2</sup> /層（締固め面積が広い）
		仕上がり面	平滑にできる。		豎置方式よりある程度凹凸になるのは避けられない。
		品質のばらつき	少ない。		吹き付け作業のみで、目標の密度を確保することは困難である。 また、転圧面積が広いため、ある程度のばらつきは避けられない。
		品質の把握	投入量（袋数）と締固め回数により把握可能。		投入量（袋数）と締固め回数によりある程度の把握は可能であるが、豎置方式よりは劣る。



表-8 横置方式と豎置方式における緩衝材の品質・施工に関する比較表(2)

項目	内容		豎置方式	横置方式	
	緩衝材の施工	施工性	発熱体の設置	位置決め・設置	内型枠の使用により可能。
設置位置の保持				設置圧が大きく、沈下、傾斜に対して横置方式より注意を要す。	設置圧が小さく、保持性が良好で、沈下、傾斜の可能性が小さい。
湧水対策			排水孔	φ76mm×L7m/本 比較的簡単な設備で可能である。	φ76mm×L25m/本 大規模な湧水対策が必要である。
			グリマット	規模が小さく(26.7m <sup>3</sup> )、設置・保持が容易	規模が大きく(94.3m <sup>3</sup> )、設置・保持が容易でない。
安全性		準備工	機械設備の搬入	小型機械のみのため、比較的搬入は容易。	バックホー、吹付け機等の搬入が必要。
			作業足場	高所作業を伴い、注意を要す。	
		緩衝材の投入		高所作業安全対策が必要。	吹付け時の粉塵対策が必要。
		締固め		人力・狭所作業	機械・狭所作業。
		発熱体の設置		吊り込み設置により、比較的容易。	豎置方式より設置方法が複雑。
		湧水対策			
		プラグの設置		比較的容易である。	作業足場の設置、高所作業を伴う。
		品質管理	密度	測定方法	測定、砂置換、RI、コアリング等の測定方法が考えられる。
測定精度				測点数の増加により精度向上が可能であるが、コアリング部の後処理に問題が残る。測定位置、測点数と測定精度の事前把握が必要。	
層厚			測定方法	レベルによる高低差	水平方向の層厚管理は、スケール、測距計による距離測定。
			測定精度	測点数の増加により精度向上が可能。	
含水比			事前計測・袋詰めにより、特に問題ない。	湿式の場合は事前混合のためばらつきは少ないが、乾式方式を採用した場合、大きなばらつきが発生する可能性大。	
施工費					
工期					
実績		室内試験		振盪締固め試験	なし
		大型試験		Big Den	なし
	原位置試験		AECL, B.C.試験	なし	
達成試験	緩衝材厚		発熱体周辺	MIN: 0.35m	MIN: 1.0m
	測点数			豎置方式<横置方式	
	熟特性		平行状態になるまでの時間	同上	
	水分特性		同上	同上	
	膨潤特性			緩衝材体積と水の浸潤により、膨潤特性が異なり、一概に比較できない。	
	データ取得			規模が小さいため、平衡状態になるまでの時間が短く、短期間でデータの取得が可能。	平衡状態になるまでの時間が長く、データの取得に時間を要する。促進方法の検討が必要である。

表-8 横置方式と竖置方式における緩衝材の品質・施工に関する比較表 (3)

	項目	内容	緩衝材の品質・施工に関する比較表 (3)	
			竖置方式	横置方式
緩衝材の特性	自己シール性		層間部、型枠とのすきま部でのシール性が問題となり、施工方法の検討を要する。	層間部、型枠とのすきま部でのシール性が問題となり、施工方法の検討を要する。 下半面にクラックが生じやすく、自己治癒しにくい。
	発熱体支持力性能		緩衝材底面の設置圧が大きいため、圧密沈下の可能性が横置方式より大きい。	緩衝材下部の設置圧が小さいため、圧密沈下の可能性は小さい。
プラグ			φ1.9m (規模が小さいプラグで可能)	φ4m×W0.5m (規模の大きなプラグが必要となる)

表-9 吹付機による緩衝材締固め試験結果一覧

試料		含水比	吹付厚	乾燥密度	飽和度
		(%)	(cm)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
16T10	吹付	16.5	10	1.33	46
	転圧	16.5	—	1.73	87
16T14	吹付	17.0	14	1.07	31
	転圧	15.9	—	1.73	84
20T10	吹付	22.2	10	1.09	42
	転圧	22.5	—	1.50	82

吹付は3試料の平均、転圧は2試料の平均

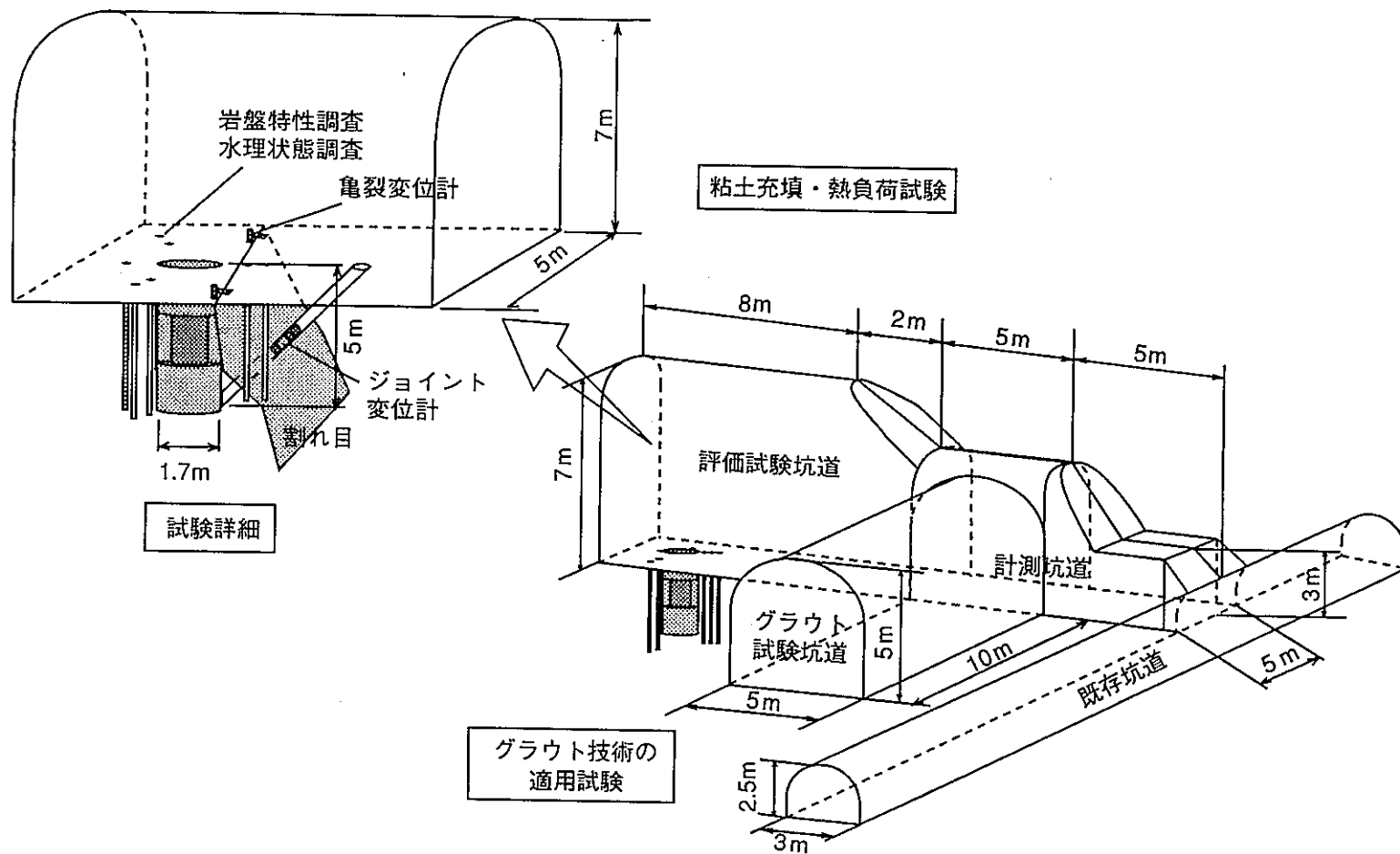


図-10 人工バリア試験レイアウト

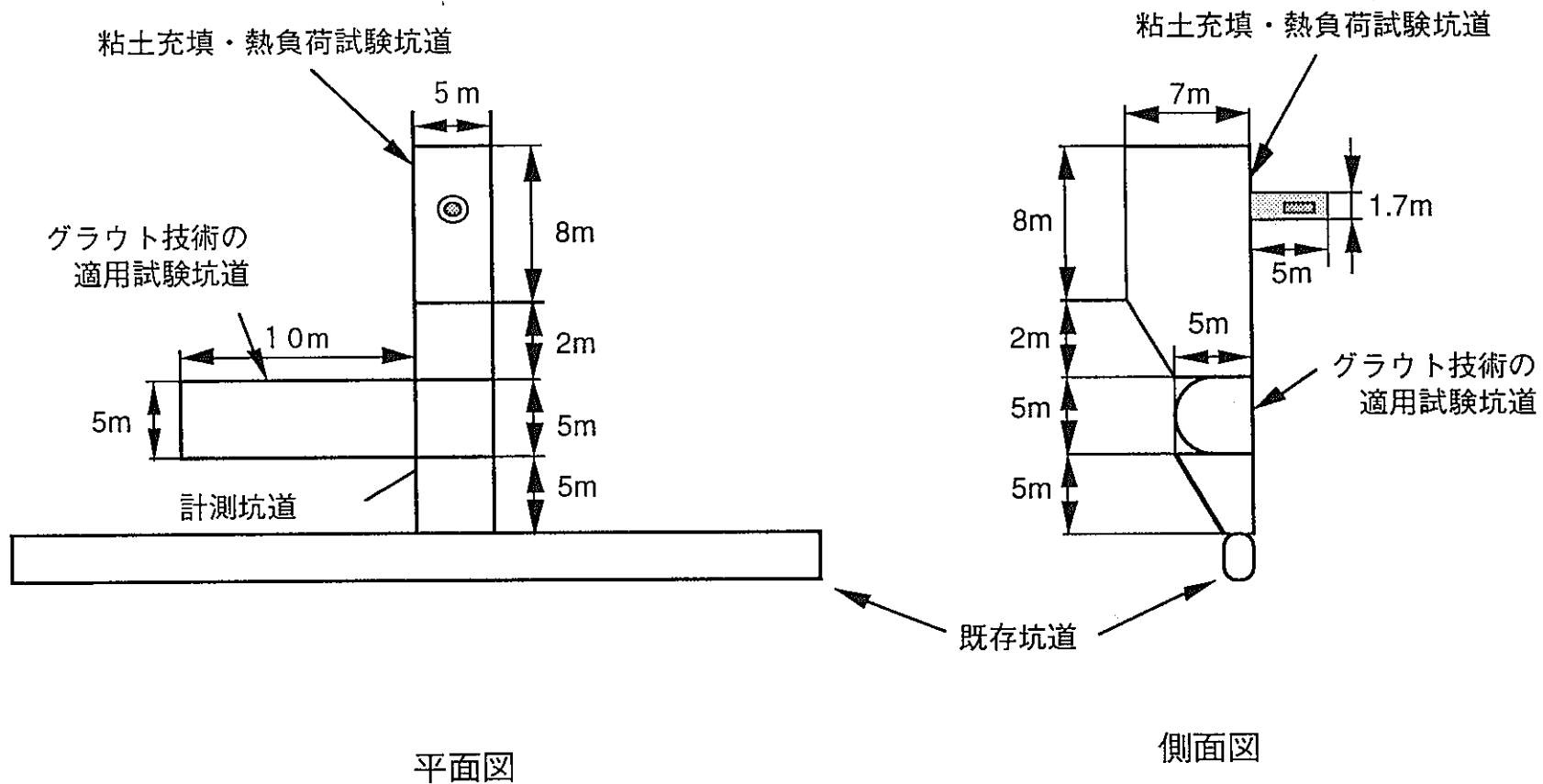


図-11 人工バリア試験図

### 2.1.5 目的の確認手法

#### (1) 人工バリア（緩衝材）の品質

現場作業における土質材料の締固め度を測定する手法の一覧を表-10に示す。本試験では、緩衝材施工中と試験終了時の2回に分けて密度と含水比の測定を行い、品質を確認する(表-11)。

#### (2) 連成モデルの妥当性

これまでに熱-水-応力連成モデルの開発として、緩衝材に関する各種要素試験や Big- Benのような工学規模試験を進めるとともに、水分移動および膨潤応力のモデル化を実施している。今後は、これらに加えCOUPLEを用いて岩盤も含めたニアフィールドの熱-水-応力連成モデルの開発を実施していく予定である。試験終了後にこれらの熱-水-応力連成モデルを用いて連成モデルの妥当性を確認する。

表-10 締固め度測定方法の種類

	方法	原理・特徴	適用土質		使用状況	測定方法の基準
			礫	砂 粘		
密度	ブロックサンプリング	掘り出した土塊の体積を直接（パラフィンを塗布し、液体に没すなどして）測定する。	←→			
	コアカッター法	定容積のモールドを土中に圧入する。	←→		△	土質工学会
	砂置換法（注砂法）	乾燥砂 } 掘り出し跡の穴を別の材料で置換することにより、掘り出した土の体積を知る。	←→		◎	JIS A 1214
	砂置換法（突砂法）		←→		○	日本道路公団他
	ラバーバルーン法		←→		○	土質工学会
	シード法		←→		○	土質工学会
	RI法（透過型）	土中での放射線（ガンマ線）透過減衰を利用した間接測定，線源棒挿入による非破壊的な測定法。	←→		○	土質工学会
RI法（散乱型）	土中での放射線（ガンマ線）の散乱・吸収を利用した間接測定，地表面での非破壊測定法。	←→		◇		
含水量	炉乾燥法	一定温度（110度）における乾燥	←→		◎	JIS A 1203
	急速乾燥法	フライパン，アルコール，赤外線，電子レンジ等を利用した燃焼・乾燥による簡便・迅速な測定方法。	←→		△	
	ピクノメーター法	水で満たされた容器と土試料を混入した容器の重量を比較し含水量を得る。ただし，比重は要既知。	←→			
	RI法	放射線（中性子）と土中の水素元素との散乱・吸収を利用した間接測定。非破壊測定法	←→		○	土質工学会
強度・変形	平板載荷試験	静的載荷による。変形指示特性の測定。	←→		○	JIS A 1215他
	現場CBR試験	静的載荷による。変形指示特性の測定。	←→		○	JIS A 1211
	ポータブルコーン貫入	コーンの静的貫入抵抗の測定	←→		△	
	ブルーフローリング	ダイヤローラーなどの転圧車輪の沈下・変形量（目視）より締固め不良箇所を知る。	←→			
	球体落下試験	球体落下時のくぼみ量の測定。	←→		△	北海道開発局
	横方向ロード載荷	土中に貫入させたロードに水平載荷を行い，変形・せん断特性を測定。重錘落下時の衝撃加速度，機械インピーダンス，振動載荷時の応答加速度などから間接測定。	←→		◇	
	急速管理法	含水比の測定なしに，グラフを用い簡便に現場の締固め度を得るモールド試験	←→			

◎：標準的方法，○：目的に応じて使用，△：簡便・補助的な方法，◇：研究開発中

表-11 緩衝材の品質確認

項目	方法	問題点	本試験での適用	
			施工時	試験終了後
コアカッター法	一定容積のモールドを締固めた地盤に圧入し、モールド内材料の重量と含水比を測定することにより、湿潤密度と乾燥密度を算定する。	地盤が硬い場合不向き。	○	○
出来型測定法	各層毎に材料投入量と締固め前と後のレベルを測定することにより、その層の平均的な密度を算定する。	平均的な値しか求められない。	○	
砂置換法	測定地盤の土を掘り出して孔をあけ、その土の重量と試験孔の体積を求めることにより、湿潤密度と乾燥密度を算定する。	測定に時間がかかる。		○
RI法	土中での放射線の透過減衰を利用し、地盤密度および含水比を間接的に測定する方法である。	岩盤や他の障害物がある場合、影響される。		



#### 2.1.6 予備解析

本試験の試験計画を策定するに当たり、これまでにBigBenの取得データ等に基づいて開発・検証されてきた熱-水-応力連成解析コード「THAMES」<sup>19)</sup>を用いて、予備解析を実施した(図12~16)。

予備解析の結果、熱-水-応力連成現象の立ち上がりを把握するためには、処分孔設置方式の場合1年程度、横置坑道方式の場合1年半の試験期間で充分把握することが可能であることが確認された。

数値解析による予備解析一覧

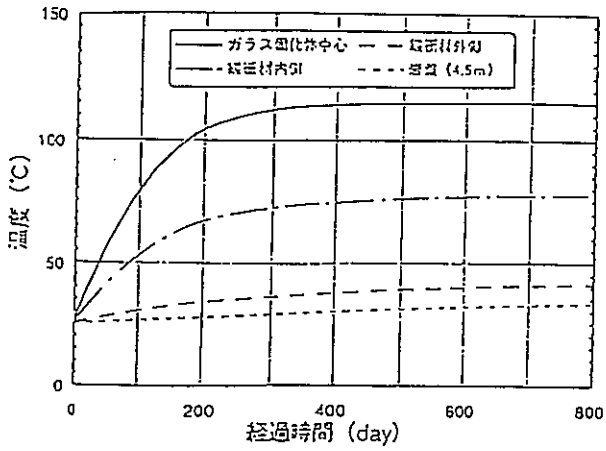


図-12 温度の経時変化 (緩衝材厚100cm)

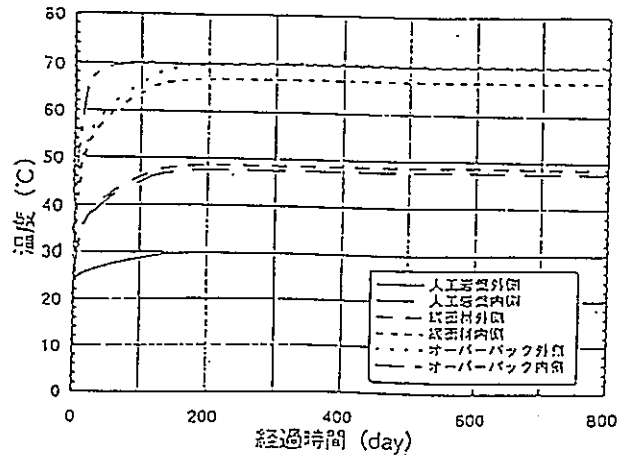
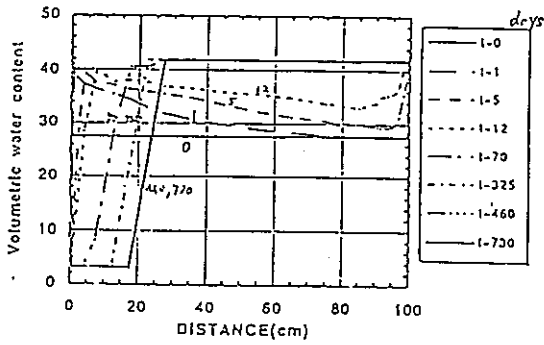
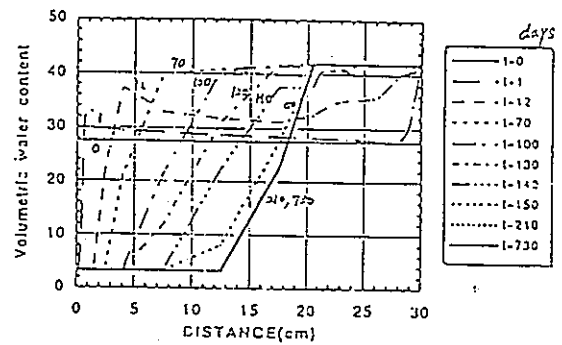


図-13 温度の経時変化 (緩衝材厚30cm)



解析条件-ヒーター側80°C  
岩盤側46.7°C  
温度勾配1/3(°C/cm)



解析条件-ヒーター側80°C  
岩盤側70°C  
温度勾配1/3(°C/cm)

図-14 緩衝材中の含水比分布 (緩衝材厚100cm)

図-15 緩衝材中の含水比分布 (緩衝材厚30cm)

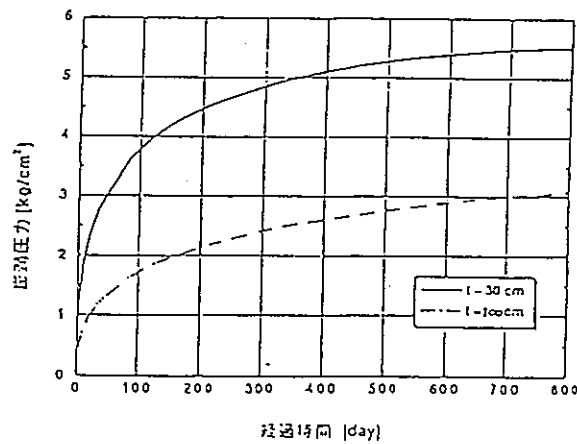


図-16 膨潤圧の経時変化 (緩衝材厚100cm、30cm)

### 2.1.7 実施内容

不連続性岩盤における人工バリア（緩衝材）の品質と連成モデルの妥当性を確認することを目的とするから、ここでは以下に示す3本の亀裂に着目する。

亀裂1：試験孔に隣接する大きな亀裂。

グラウト試験場の湧水亀裂と連なっており、他の湧水亀裂と同じく黒っぽい鉱物から構成される。ここでは、試験孔掘削による挙動および連成試験時の挙動に着目する。

亀裂2：試験孔を横切る亀裂。

試験孔の横にこの亀裂からと思われる湧水が有る。ここでは、試験孔掘削による挙動、緩衝材施工時および連成試験時の挙動に着目する。

亀裂3：試験孔に隣接する小さな亀裂。

ここでは、連成試験時の挙動に着目する。

#### (1) 計測坑道掘削

発破工法を用いて幅5m、高さ5～7m、全長30mの試験坑道および計測坑道を掘削する。既存坑道からの離間距離は、安全性の観点からグラウト試験坑道を既存坑道より半径程度としている。

坑道壁面の亀裂観察を行う。試験のレイアウトおよび平面図は図-10、11参照。

#### (2) 岩盤特性調査（図-17）

連成試験前の岩盤特性を把握するために、透水試験、孔内載荷試験、間隙水圧計測を実施する。卓越した3本の亀裂に着目するように試錐孔のレイアウトを行う。

試験坑道より透水試験、孔内載荷試験、間隙水圧計測、孔径・岩盤ひずみ計測、亀裂変位計測用試錐孔の削孔を行い、ボアホールTVを用いた試錐孔内壁面の亀裂観察およびコア観察を行う。

透水試験は、単孔式透水試験および孔間透水試験を実施し、間隙水圧測定孔で圧力変化をモニタリングする。また、試錐コアを用いて室内岩石試験（クリープ試験、一面せん断試験等）を行う。

#### (3) 試験孔掘削

大口径岩盤掘削工法を用いて試験坑道床盤に直径1.7m、深さ5mの試験孔を掘削する。掘削後、試験孔壁面の亀裂観察を行う。試験孔口周りには、連成試験時の蓋と試験孔との隙間からの湧水対策として幅30cm、高さ50cmのコンクリート台を作成する。

試験孔掘削に伴う岩盤変位を測定する。また、止水対策として試験孔掘削後孔内に極めて多くの湧水が認められるときには、緩衝材設置のために止水試錐孔を削孔

し、止水試験錐孔に排水用ポンプを据え付け、連成試験開始時まで止水対策を行う。

(4) 緩衝材施工 (図-18)

緩衝材は、ベントナイト (クニゲルv1) +ケイ砂の粉末をタンパーを用いて試験孔内に直接締固める締固め方式により施工する。施工途上で適宜密度測定を行う。

緩衝材の充填乾燥密度は $1.6\text{g/cm}^3$ 程度とする。

緩衝材の設置に並行して、炭素鋼を用いた発熱体 (直径1 m、長さ2 m) および以下に示すデータ計測用機器を緩衝材中に設置する。なお、発熱体は事前に製作しておくものとする。

緩衝材設置後にコンクリート蓋 (直径2.3m) の施工を行う。コンクリート蓋をコンクリート台に設置し、H鋼より反力を取る。蓋と台の隙間には止水パッキングを入れる。

(5) 連成試験

連成試験坑道入口付近にカーテンを設け、試験空洞内の温度を一定に保ち、空洞内の湿度を連続計測する。また、湧水がある場合には空洞外に出る湧水量の測定を行う。

発熱体を加熱し、連成試験を行う。止水対策工で試験孔内への湧水が認められず止水試験錐孔を削孔しなかった場合には、新たに注水孔を設け内部に注水ポンプを設置し、強制注水を実施する。また、止水対策工で試験孔内への湧水が認められ止水試験錐孔を削孔し強制排水を実施した場合には、排水ポンプを外して連成試験を行う。さらに、排水ポンプを外しても十分な流量が得られない場合、止水孔に注水ポンプ入れ強制注水を実施する。定常に達したことが確認された後、ヒーターを止め、連続計測を行う。

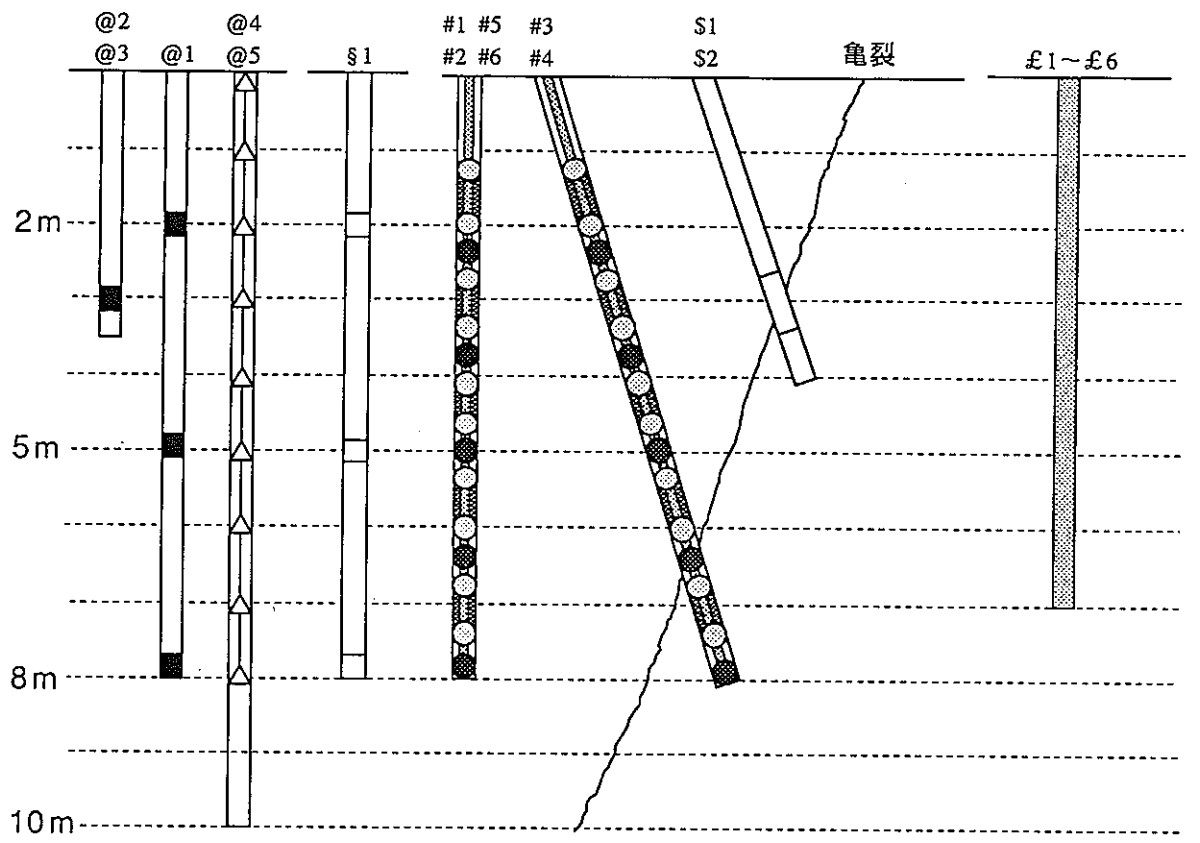
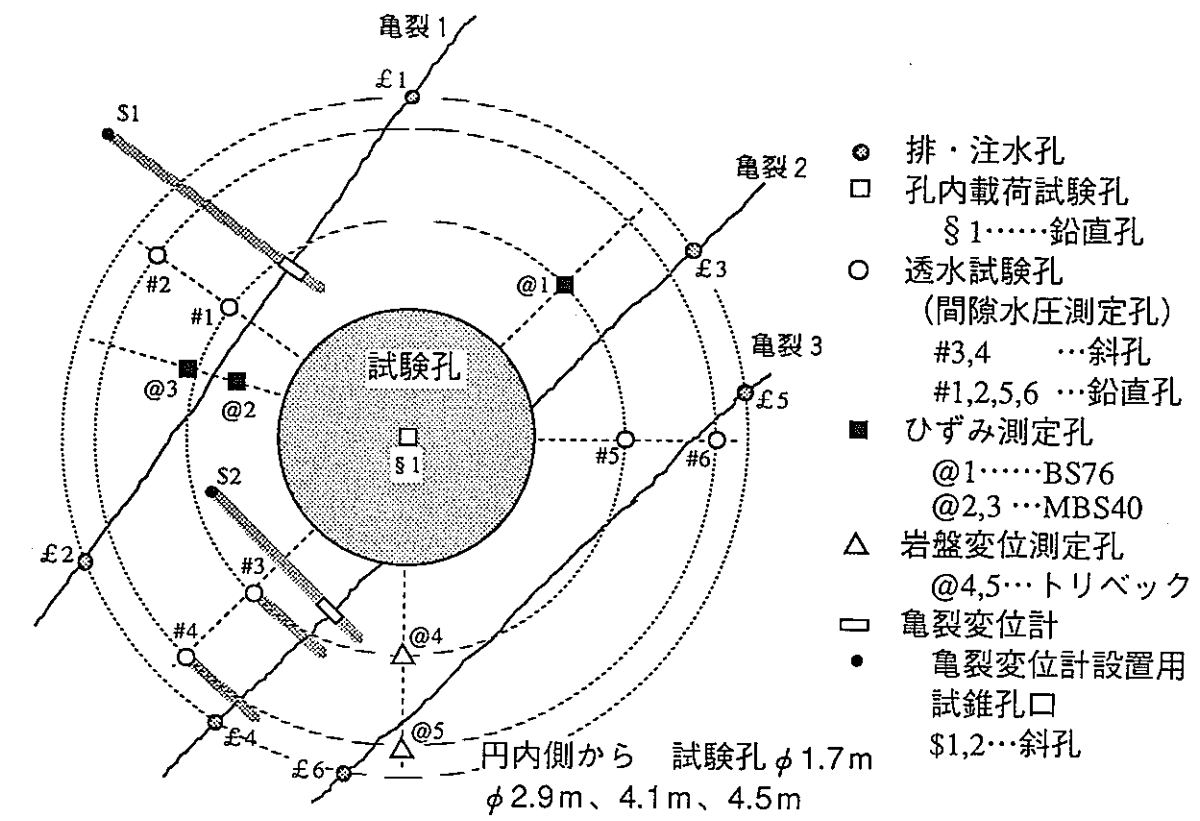
試験中、試験終了前に緩衝材のサンプリングを行い、密度と含水比の測定を行う。

上述の実施内容とは別に、試験計画案の検討、解析評価を実施する。

詳細をAppendix I に、工程表を表-12に示す。

表-12 粘土充填・熱負荷試験工程

		平成5年度	平成6年度	平成7年度	平成8年度	平成9年度
試験計画案の検討		○-----○				
試験坑道および計測坑道の掘削			○-----○			
岩盤特性調査	試錐・計測孔内壁面観察 透水試験 孔内載荷試験 機器設置 計測 岩盤変位測定 室内岩石試験			○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○		
試験孔の掘削および試錐	孔口周り工事 試験孔掘削・壁面観察 岩盤変位測定 ポンプ ヒーター製作			○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○		
緩衝材施工	緩衝材の設置（締め固め方式） 発熱体、緩衝材中の計器の設置 プラグ（ふた）の施工				○-----○ ○-----○ ○-----○	
連成試験	加熱・注水 計測 緩衝材サンプリング 透水試験 岩盤変位測定				○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○ ○-----○	



ひずみ測定孔    孔内載荷    透水試験孔    亀裂変位計    排・注水孔  
 左；ひずみ測定    試験孔    ● パッカー位置    設置孔  
 右；岩盤変位測定    ● 間隙水圧計

図-17 粘土充填・熱負荷試験岩盤内計器配置

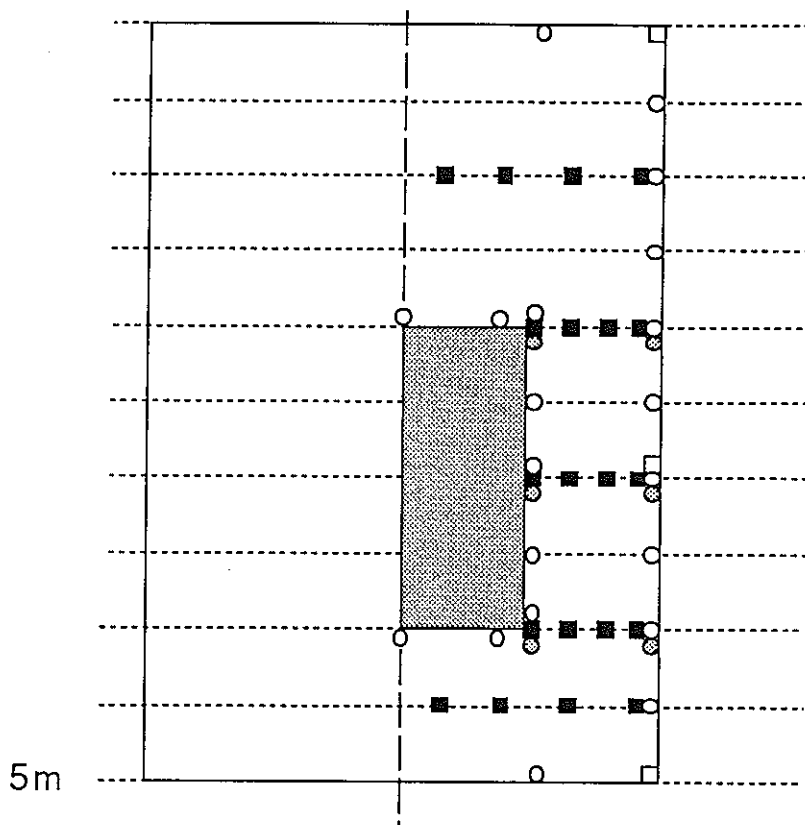
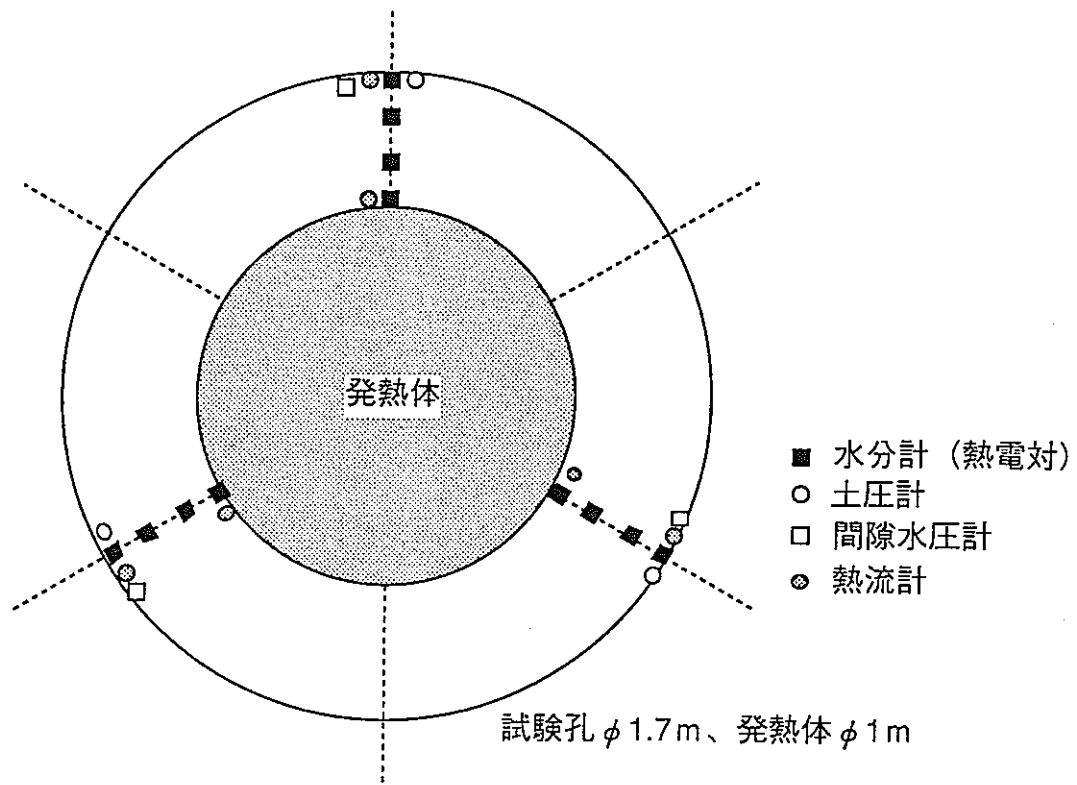


図-18 緩衝材内計測機器配置

## 2.2 グラウト技術の適用試験

### 2.2.1 位置付け

空洞の掘削に伴う亀裂からの湧水や、力学的、水理的ゆるみ域の発生に伴う地下水の卓越流路の形成は、地下空間利用等の面からしばしばグラウト等による止水対策が要求される。

地層処分におけるグラウト施工では、地層の有する本来の地質環境を極力乱さないようにする観点から、セメント等を避けて粘土系材料を使用せざるを得ない場合がある。固形化しない粘土系グラウトは、主として亀裂等のめづまり効果を期待するものであるが、その止水効果、安定性、改良範囲の評価が重要となる。これらの性能は、亀裂の性状、注入圧、濃度等に依存するため、釜石原位置試験場において、それらをパラメータとしたグラウト技術の適用試験を実施し、実岩盤条件下での粘土系グラウトの基本性能を把握する。

### 2.2.2 目的

粘土系グラウトはセメントグラウトに比べて、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。また、原位置における施工例も少ないことから、原位置における粘土系グラウト試験を実施し、亀裂の性状（主として亀裂幅）、施工条件（注入圧、濃度）とグラウトの基本特性（安定性、止水効果）との関係を確認する。これらを確認することにより、実際的な条件の明確化等、シーリング概念の詳細化を図る。

### 2.2.3 試験場所

影響評価試験と同じ場所で試験を実施するため、図-8、9に示すように試験場所を釜石原位置試験場550mレベル坑道LABROCK岩体採取付近とし、グラウト試験用の坑道を計測坑道から鉛直に配置する。

### 2.2.4 目的の確認手法

グラウト効果の確認方法に関してはセメントグラウトに関するものがほとんどであり、一例としてこれまでにボアホールを用いた電磁波によるグラウトの侵入範囲の測定<sup>14)</sup>、弾性波を用いた改良効果の確認法<sup>15)</sup>等の方法が挙げられる。これらはグラウトを施工する範囲を挟んでボアホールを掘削し、ボアホール間の電位や弾性波速度の変化からグラウトの侵入範囲等を把握するものである。

亀裂性岩盤の透水性の評価に関しては、神尾らがコアを用いた評価を行い<sup>16)</sup>、亀裂



性岩盤の透水係数とルジオン値の関係に関しては、山口、松本が原位置での取得データの取扱について報告している<sup>17)</sup>。また、青木らはクロスホール透水試験が岩盤水理の異方性を評価するのに有効であることを示している<sup>18)</sup>。

一方、粘土グラウトに関しては、これまで効果を確認する評価手法は確立されていない。本試験においては、透水性の変化をグラウトの効果を表す一指標と考え、グラウト前後の透水係数を測定する。また、坑道全体としての湧水量を測定する。さらにグラウトの長期安定性、止水効果を行うため、1年および2年経過後に透水試験を実施する。

## 2.2.5 実施内容(図-19)

### (1) 岩盤特性調査

試験坑道より透水試験用試錐を実施する。岩盤の割れ目状況を把握するためボアホールTVを用い試錐孔内壁面の亀裂観察を行う。

グラウト注入前の岩盤状況（透水性）を把握するため、孔間トモグラフィーおよび透水試験を実施する。

### (2) グラウト注入

試験坑道よりグラウト注入用試錐を実施する。岩盤の割れ目状況を把握するためボアホールTVを用い試錐孔内壁面の亀裂観察を行う。

グラウト注入孔を用いて透水試験を実施し、グラウト注入前の岩盤状況を把握する。

グラウト注入は、低圧、低濃度→中圧、低濃度→高圧、低濃度→高圧、中濃度→高圧、高濃度の順で計5ステージで行っていく。

### (3) 効果確認試験

グラウト工終了後のグラウト注入による止水効果、安定性、改良範囲（改良程度）を確認するために、孔間トモグラフィーおよび透水試験を実施するとともに試錐孔内壁面の観察を実施する。さらにグラウトの長期安定性、止水効果を行うため、1年および2年経過後に透水試験を実施する。

上述の実施内容とは別に、試験計画案の検討を実施する。

詳細を Appendix II に、工程表を表-13に示す。

表-13 グラウト技術適用試験工程

		平成5年度	平成6年度	平成7年度	平成8年度	平成9年度	
試験計画検討		○-----○					
岩盤特性調査	試錐 孔内亀裂観察 透水試験 孔間トモグラフィ			○ ○ ○ ○			
グラウト注入	グラウト注入 湧水量測定			○ ○ ○			
効果確認試験	孔内亀裂観察 孔間トモグラフィ 透水試験			○ ○ ○		○ ○	

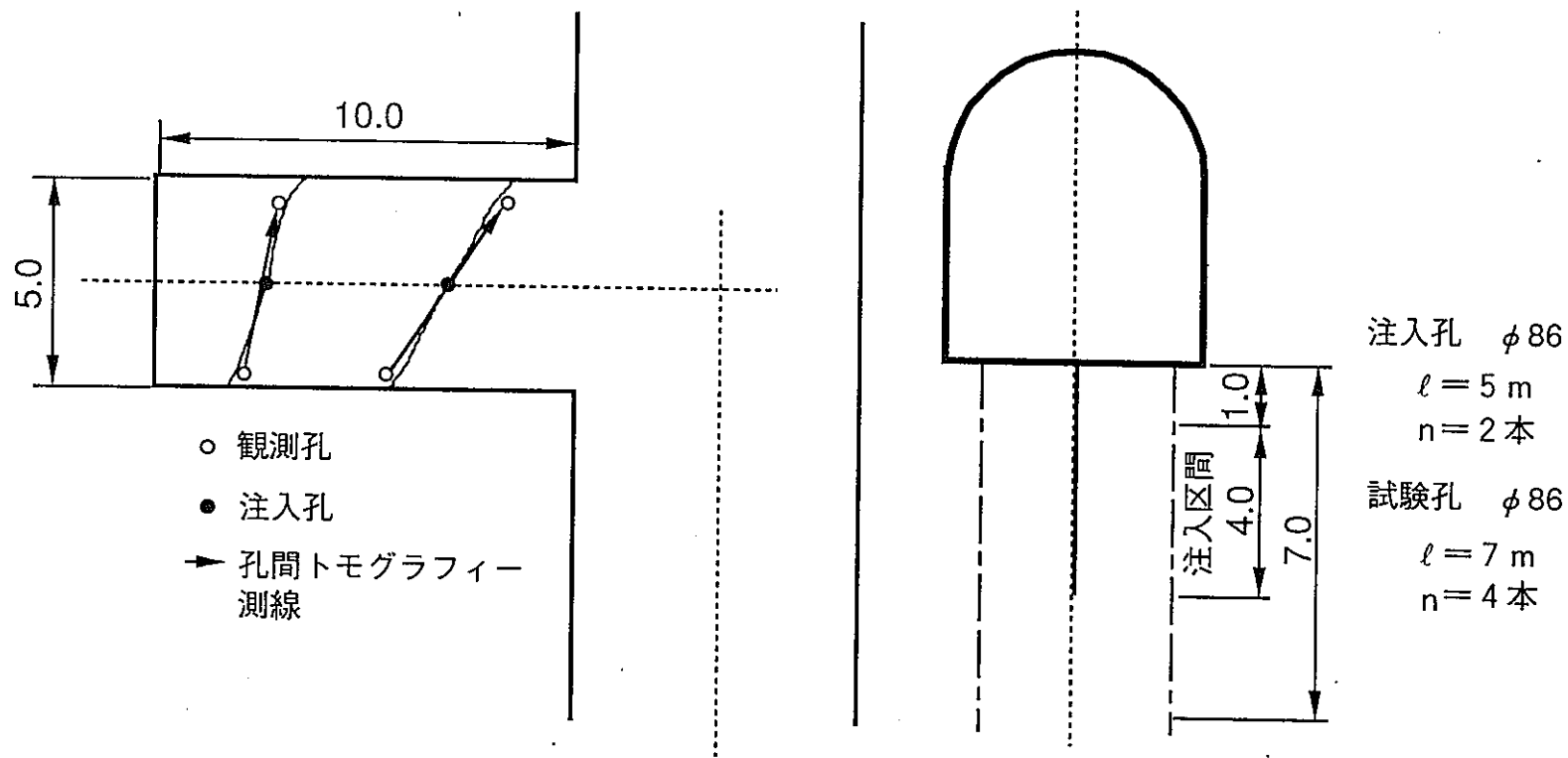


図-19 グラウト技術の適用試験レイアウト

### 3. まとめ

本計画書案は、釜石原位置試験場でとりおこなう人工バリア試験の試験計画案について平成6年10月までの計画案をとりまとめたものである。本試験は、釜石原位置試験期間中に行うことから試験期間は平成9年度で終了する計画である。人工バリア試験では、影響評価試験およびグラウト技術の適用試験を行う。

影響評価試験では、位置付け、目的、試験場所、試験方式、目的の確認手法、予備解析、実施内容について検討し、基本方式を処分孔縦置方式とした。実施内容は

- (1) 試験坑道および計測坑道の掘削
- (2) 試験孔の掘削および試錐
- (3) 岩盤特性調査
- (4) 岩盤内計器の設置
- (5) 緩衝材施工
- (6) 連成試験

の6項目である。

グラウト技術の適用試験では、位置付け、目的、試験場所、目的の確認手法、実施内容について検討し、実施内容は

- (1) 岩盤特性調査
- (2) グラウト注入
- (3) 効果確認試験

の3項目である。

今後、さらに検討を進めていく中で、最適化をたえず図っていくものである。参考として、バッファマス試験、Big-Ben、人工バリア試験の比較表を表-14に示す。

表-14 バッファマステスト, 緩衝材大型試験, 釜石人工バリア試験の比較

項目	バッファマステスト (BMT)	緩衝材大型試験 (Big-Ben)	釜石人工バリア試験	
場所	スウエーデン、ストリッパ銅山	東海事業所	釜石銅山	
母岩	花崗岩	人工岩盤 (コンクリート)	花崗岩	
試験方式	坑道設置方式	坑道設置方式	坑道設置方式	
規模	φ 0.8m × L 3.0m	φ 1.7m × L 5.0m	φ 1.7m × L 5.0m	
掘削工法	機械掘削工法 (コアボーリング)	-	機械掘削工法 (全断面ボーリング)	
蓋	コンクリート, 厚さ1.5~1.7m	コンクリート, 厚さ0.5m	コンクリート, 厚さ0.5m	
緩衝材	方式	ブロック方式, 厚さ0.2m	現場突固め方式, 厚さ0.3m	
	配合	ベントナイト100%	ベントナイト/珪砂=7/3	
	初期値	乾燥密度1.75g/cm <sup>3</sup> , 含水比20%	加熱試験: 乾燥密度1.7g/cm <sup>3</sup> , 含水比11% 加熱注水試験: 乾燥密度1.6g/cm <sup>3</sup> , 含水比27%	
オーバーバック	-	炭素鋼, φ 1.0m × L 2.0m	炭素鋼, φ 1.0m × L 2.0m	
ヒータ	大きさ	φ 0.4m × L 1.5m	φ 0.4m × L 1.4m	
	出力	0.6kW, 1.2kW, 1.8kW	0.8kW	
浸潤条件	岩盤亀裂からの浸潤	注水孔からの浸潤	岩盤亀裂からの浸潤	
期間	1~3年半	加熱試験: 半年 加熱注水試験: 約2年	1年半~2年	
試験結果	温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>WET孔では、テスト初期を除いて温度分布は予測値と実測値が一致。</li> <li>DRY孔では、ヒータ近傍のベントナイトの乾燥ひび割れが発生。</li> <li>高出力テストでは、熱伝導率の温度依存性、ヒータ近傍の空隙が影響。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加熱試験の結果、緩衝材の最高温度は60℃、温度勾配は、0.5℃/cm。</li> <li>加熱注水試験の結果、一年程度で定常状態になった。</li> <li>両試験とも解析結果と一致。</li> </ul>	[期待されるデータ] 緩衝材、岩盤内の温度分布を計測すると共に、温度発生による周辺岩盤への影響(熱応力)、緩衝材内の水分分布への影響、応力・水分の温度分布への影響を把握する。
	水分	<ul style="list-style-type: none"> <li>ヒータ加熱により当初の含水比の再配分が生じる。</li> <li>wet孔のヒータ付近でも2.1年後には、飽和度が80~90%となる。</li> <li>1400W加熱孔のヒータ中心で含水比は19~22%とはほぼ均一な分布を示し、ヒータ付近の水分を乾燥させるまでには至らないが最上部では含水比が最大35%となり膨潤状態を示した。</li> <li>試験孔の目視された節理は吸水過程の均一性にとってあまり影響しない。</li> <li>発破で掘削したトンネルでは底盤に生じた亀裂が緩衝材への水の主な供給源となっている。</li> <li>Lull水分計は実用的でない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加熱試験の結果、ヒータ加熱により当初の含水比の再配分が生じる。初期含水比に対しヒータ近傍では低下し、人工岩盤側では増加。</li> <li>加熱注水試験の結果、初期含水比に対しヒータ近傍での低下が見られ、浸潤フロントが形成された。</li> </ul>	[期待されるデータ] 緩衝材の現場突固め方式による施工、岩盤亀裂からの水の浸潤という実岩盤条件下における緩衝材内の浸潤状況を把握する。また、岩盤亀裂からの浸潤条件下における均一浸潤層の適応性を把握する。
	膨潤圧	<ul style="list-style-type: none"> <li>最大の膨潤圧はWET孔で発生(SP max =10MPa)し、予測値と良く対応。</li> <li>鉛直方向の膨潤圧は水平方向に比べて小さい。</li> <li>膨潤圧の発生原因としては、温度勾配による緩衝材内部の水の再配分(DRY孔)やクラック、岩盤からの水の補給が考えられる。</li> <li>保水クラックの分布や傾度は膨潤圧発生に均一性に影響を与えない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加熱試験の結果、膨潤圧の発生は見られなかった。</li> <li>加熱注水試験の結果、膨潤圧の発生が見られた。方向によりその大きさが異なる。</li> </ul>	[期待されるデータ] 膨潤圧の分布、膨潤圧発生によるゆるみ域の発生やジョイントの実位、透水性等の周辺岩盤への影響を把握する。
	状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>ブロック間の継ぎ目は試験後見分けられなくなっている。</li> <li>ヒータとベントナイト、岩盤とベントナイト間の空隙は、試験後無くなっている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加熱部分注水試験の結果、ブロック境界面を水が通過した痕跡と考えられる跡が観察された。</li> </ul>	・原位置における緩衝材の品質(密度、均一性)に関する評価を行う。

## 参 考 文 献

- 1) 動力炉・核燃料開発事業団；高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-、PNC TN1410 92-081、1992
- 2) 佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験、-緩衝材大型試験設備の概要および加熱試験計画について-、PNC N8410 90-060、1990
- 3) 佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験、第2報、-加熱試験結果について-、PNC N8410 91-075、1991
- 4) 佐藤信二他；緩衝材の熱-水-応力連成試験、第3報、-加熱・部分注水試験結果について-、PNC N8410 92-043、1992
- 5) 茂呂吉司他；緩衝材の熱-水-応力連成試験、第4報、-加熱・全面注水試験結果について-、PNC N8410 93-294、1993
- 6) A.S.P. Selvadurai；Thermal performance of a buffer material developed for use in a nuclear waste disposal vault borehall -I.Experimental modelling, 1988
- 7) R.Pusch and L.Börgesson；Final Report of the Buffer Mass Test-Volume II: test results,SKB Technical report, 85-12, 1985
- 8) 杉田裕他；岩盤内充填粘土挙動試験-試験概要および計測結果について-、PNC N8410 94-309、1994
- 9) 柴田功；ダム基礎岩盤における地圧測定と合理的なグラウチング注入圧力選定法、土木学会論文集、No.436/III-16、pp.121-130、1991
- 10) 櫻井聖、生形健司；道平ダムのコンソリデーショングラウチングについて、ダム技術 No.42、pp.58-64、1990
- 11) 山口嘉一；ダム基礎岩盤の改良と置き換え、第11回岩盤システム工学セミナー「岩盤補強と岩盤改良の技術の現状と課題」、pp.155-174、1994
- 12) 蒔田敏明、宮永佳晴；粘土グラウトによる地下水の制御、土木施工、No.33vol.12、pp.30-38、1992
- 13) Y.Ohnishi, H.Shibata, A.Kobayashi；Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, edited by Tsang, C.F., pp.679-697, 1989
- 14) 北村孝海他；岩盤レーダーによる水みち推定およびグラウト硬化過程と効果の推定、土木学会論文集、No.454/III-20、pp.83-92、1992
- 15) 世一英俊他；孔間弾性波測定によるグラウチング前後の改良効果の判定について、21st岩盤力学に関するシンポジウム、pp.151-155、1989
- 16) 神尾重雄他；亀裂性岩盤の透水性評価に関する一考察、土木学会論文集、No.424/III-14、pp.261-269、1990

- 17) 山口嘉一、松本徳久；岩盤のルジオン値と透水係数の関係、土木学会論文集、No.454/III-20、pp.123-126、1992
- 18) 青木謙治他；亀裂性岩盤の透水特性評価に対するクロスホール透水試験の適用性について、第8回岩の力学国内シンポジウム、pp.441-446、1990

## Appendix I

### (1) 計測坑道掘削

#### 1) 試験坑道および計測坑道掘削、坑道壁面亀裂観察

発破工法を用いて幅5m、高さ5~7m、全長30mの試験坑道および計測坑道を掘削する。既存坑道からの離間距離は、安全性の観点からグラウト試験坑道を既存坑道より半径程度としている。

坑道壁面の亀裂観察を行う。

### (2) 岩盤特性調査

卓越した3本の亀裂に着目するように試錐孔のレイアウトを行う。

#### 2) 透水試験、孔内載荷試験、間隙水圧計測用試錐孔の削孔、試錐孔内壁面亀裂観察

試験坑道より透水試験、孔内載荷試験、間隙水圧計測用試錐孔の削孔を行う。

ボアホールTVを用いた試錐孔内壁面の亀裂観察およびコア観察を行う。

##### a) 透水試験、間隙水圧計測用試錐孔 (#1~#6)

試錐孔#1、#2、#3、#4については亀裂1、2を横切るように斜孔とし、間隙水圧計の1つが亀裂に交差するように配置する。

$\phi 66\text{mm} \times 2\text{本} \times 3\text{方向} (L=8\text{m})$

##### b) 孔内載荷試験用試錐孔 (§1)

$\phi 76\text{mm} \times 1\text{本} (L=8\text{m})$  試験孔中心位置

#### 3) 間隙水圧計 (兼温度計測) の設置 (外側: #2、#4、#6)

間隙水圧計を以下の地点に設置する。

1孔 $\times$ 5深度 $\times$ 3方向=15個

#### 4) 単孔式透水試験

単孔式透水試験を以下の地点で行う。

透水試験用試錐孔 (内側: #1、#3、#5) 1孔 $\times$ 3深度 $\times$ 3方向=9地点

#### 5) 間隙水圧計 (兼温度計測) の設置 (内側: #1、#3、#5)

間隙水圧計を以下の地点に設置する。

1孔 $\times$ 5深度 $\times$ 3方向=15個

#### 6) 孔間透水試験

孔内載荷試験用試錐孔を注入孔として孔間透水試験を行い、間隙水圧測定孔で圧力変化をモニタリングする。

孔内載荷試験用試錐孔 1孔 $\times$ 3深度=3地点

#### 7) 孔内載荷試験

孔内載荷試験を以下の地点で行う。



孔内載荷試験用試錐孔 1孔×3深度=3地点

- 8) 孔径・岩盤ひずみ計測、亀裂変位計測用試錐孔の削孔、試錐孔内壁面亀裂観察  
試験坑道より試錐孔の削孔を行う。

ボアホールTVを用い試錐孔内壁面の亀裂観察およびコア観察を行う。

- a) 孔径ひずみ計測用試錐孔 (@1)  
φ 76mm × 1本 × 1方向 (L=8m)
- b) 岩盤ひずみ計測用試錐孔 (@2、@3)  
φ 66mm × 2本 × 1方向 (L=3.5m)
- c) 岩盤変位計測用試錐孔 (@4、@5)  
φ 126mm × 2本 × 1方向(L=10m)
- d) 亀裂変位計設置用試錐孔 (\$1、\$2)  
φ 66mm × 2本 (L=5m)

- 9) 岩盤内計器の設置

岩盤内に以下の計器を設置する。

- a) 孔径ひずみ計  
1孔×3深度×1方向=3個
- b) 岩盤ひずみ計  
2孔×1深度×1方向=2個
- c) 熱電対計 (T型シース)  
a)、b)のひずみ計と同地点に設置する。  
1孔×3深度×1方向+2孔×1深度×1方向=5個
- d) 岩盤変位計 (トリベック)  
2孔
- e) 亀裂変位計  
2個

- 10) 岩盤変位測定

以下の地点において岩盤変位の測定を行う。

岩盤変位計測用試錐孔 (@4、@5)

- 11) 室内岩石試験

試錐コア供試体(5×10cm)を用いて以下の室内岩石試験を行う。

クリープ試験 (一年間測定)

一面せん断試験

その他

(3) 試験孔掘削

12) 試験孔口工事

連成試験時の蓋と試験孔との隙間からの湧水対策として試験孔口周りに幅30cm、高さ50cmのコンクリート台を作成する。

13) 試験孔掘削、試験孔内壁面亀裂観察

大口径岩盤掘削工法を用いて試験坑道床盤に直径1.7m、深さ5mの試験孔を掘削する。試験孔壁面の亀裂観察を行う。

14) 岩盤変位測定

以下の地点において岩盤変位の測定を行う。

岩盤変位計測用試験孔 (@4、@5)

15) 止水対策工

試験孔掘削後孔内に極めて多くの湧水が認められるときには、緩衝材設置のために止水試験孔を削孔する。止水試験孔に排水用ポンプを据え付け、連成試験開始時まで止水対策を行う。ボアホールTVを用いた試験孔内壁面の亀裂観察およびコア観察を行う。

$\phi 66\text{mm} \times 6\text{本} (L=7\text{m}) (\#1 \sim \#6)$

(4) 緩衝材施工

16) 緩衝材施工

緩衝材は、ベントナイト（クニゲルv1）+ケイ砂の粉末をタンバーを用いて試験孔内に直接締固める締固め方式により施工する。施工途上で適宜密度測定を行う。

緩衝材の充填乾燥密度は $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 程度とする。

17) 発熱体、緩衝材中の計測機器の設置

緩衝材の設置に並行して、炭素鋼を用いた発熱体（直径1m、長さ2m）および以下に示すデータ計測用機器を緩衝材中に設置する。なお、発熱体は事前に製作しておくものとする。

a) データ収録装置、スキャナ、データロガ（共和電業製）

1式

b) ひずみ計

1点 $\times$ 10深度 $\times$ 3方向=30個

c) 間隙水圧計

1点 $\times$ 3深度 $\times$ 3方向=9個

d) 熱電対（T型シース）

4点 $\times$ 5深度 $\times$ 3方向=60個

e) 水分計 (Thermocouple Psychrometers)

4点×5深度×3方向=60個

f) 土圧計

11深度×3方向=33個

7点×3方向+2点=23個

g) 熱流束計

2点×3深度×3方向=18個

18) コンクリート蓋の施工

緩衝材設置後にコンクリート蓋（直径2.3m）の施工を行う。コンクリート蓋をコンクリート台に設置し、H鋼より反力を取る。蓋と台の隙間には止水パッキングを入れる。

(5) 連成試験

19) 境界設定

連成試験坑道入口付近にカーテンを設け、試験空洞内の温度を一定に保ち、空洞内の湿度を連続計測する。また、湧水がある場合には空洞外に出る湧水量の測定を行う。

20) 注水、加熱

発熱体を加熱し、連成試験を行う。12)止水対策工で試験孔内への湧水が認められず止水試験孔を削孔しなかった場合には、新たに注水孔を設け内部に注水ポンプ設置し、強制注水を実施する。また、12)止水対策工で試験孔内への湧水が認められ止水試験孔を削孔し強制排水を実施した場合には、排水ポンプを外して連成試験を行う。さらに、排水ポンプを外しても十分な流量が得られない場合、止水孔に注水ポンプ入れ強制注水を実施する。定常に達したことが確認された後、ヒーターを止め、連続計測を行う。

21) 膨潤圧測定

緩衝材の膨潤圧の発生状況を測定する。（土圧計）

22) 含水率測定

緩衝材の含水率の変化を測定する。（水分計）

23) 伝熱特性測定

緩衝材の伝熱特性の変化を測定する。（熱流束計、熱電対）

24) 間隙水圧測定

間隙水圧測定の変化を測定する。

25) 孔径ひずみ測定

孔径ひずみの変化を測定する。

- 26) 岩盤内ひずみ測定  
岩盤内ひずみの変化を測定する。
- 27) 岩盤変位測定  
加熱前・中・後において岩盤変位の測定を行う。
- 28) 緩衝材のサンプリング  
試験中、試験終了前に緩衝材のサンプリングを行い、密度と含水比の測定を行う。
- 29) 単孔式透水試験  
単孔式透水試験を以下の地点で行う。  
透水試験用試錐孔（#1～#6） 2孔×1深度×3方向=6地点
- 30) 岩盤変位測定  
以下の地点において岩盤変位の測定を行う。  
岩盤変位計測用試錐孔（@4、@5）

## Appendix II

### (1) 岩盤特性調査

#### 1) 試錐、試錐孔内壁面亀裂観察

試験坑道より透水試験用試錐を行なう。

岩盤の割れ目状況を立体的に把握するため、ボアホールTVを用い試錐孔内壁面の亀裂観察を行う。

#### a) 試験用試錐

$\phi 86\text{mm} \times 4\text{本} (L=7\text{m})$

#### 2) 透水試験

低圧ルジオン試験を実施する。

1式 (3深度)  $\times 4\text{本}=4\text{式}$

#### 3) 孔間トモグラフィ試験

孔間トモグラフィを実施する。

2式 (非抵抗、電磁波)  $\times 2\text{方向}=4\text{式}$

### (2) グラウト注入

グラウト工を実施し、各段階における施工条件 (注入圧、濃度) とグラウトの注入性の関係の把握を実施する。

#### 4) グラウト

#### a) 注入孔掘孔、孔内壁面亀裂観察

試験坑道よりグラウト注入用試錐を行なう。

岩盤の割れ目状況を立体的に把握するため、ボアホールTVを用い試錐孔内壁面の亀裂観察を行う。

$\phi 86\text{mm} \times 2\text{本} (L=5\text{m})$

#### b) 湧水量測定

グラウト注入前の岩盤への影響を把握するために、計測坑道内で湧水量を測定する。

#### c) 透水試験

グラウト注入前の岩盤の透水性を把握するために、低圧ルジオン試験を実施する。

1式 (3深度)  $\times 2\text{本}=2\text{式}$

#### d) グラウト注入、孔間トモグラフィ

1. 低圧、低濃度でグラウトを注入する。

2. 中圧、低濃度でグラウトを注入する。

3. 高圧、低濃度でグラウトを注入する。

4. 高圧、中濃度でグラウトを注入する。

5. 高圧、高濃度でグラウトを注入する。

(3) 効果確認試験

5) 透水試験-1

グラウト工終了後の岩盤の透水性を把握するために、低圧ルジオン試験を実施する。

1式 (3深度) × 2本 = 2式

6) 孔間トモグラフィ試験

孔間トモグラフィを実施する。

2式 (比抵抗、電磁波) × 2方向 = 4式

7) 試錐孔内壁面亀裂観察

グラウトの注入度を目視観察するために、試錐孔内の壁面亀裂観察を実施する。

8) 透水試験-2

グラウトの長期安定性、止水効果を行うため、1年経過後に低圧ルジオン試験を実施する。

1式 (3深度) × 2本 = 2式

9) 透水試験-3

グラウトの長期安定性、止水効果を行うため、2年経過後に低圧ルジオン試験を実施する。

1式 (3深度) × 2本 = 2式