PNC ZJ1100 95-001

限定資料

地層処分システムにおけるシーリング研究(Ⅳ)

(動力炉・核燃料開発事業団　委託研究報告書)

概　　要

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
Z	J1100 95-001	1995. 9. 1

この資料は技術管理室保存資料です
閲覧には技術資料閲覧票が必要です
動力炉・核燃料開発事業団　技術協力部技術管理室

1995年2月

鹿島建設株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合わせは下記に願います。

〒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

限定資料
ＰＮＣ ＺＪ1100 95-001
1995年２月

地層処分システムにおけるシーリング研究（Ⅳ）

青木　謙治*　日比谷　啓介*　塩釜　幸弘*　戸井田　克*
深沢　栄造*　平　和男*　田中　俊行*
久保田　翼**　清水　保明**　奥津　一夫**　塩崎　信久**
古市　光昭***

要　旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために掘削した地下構造物を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材等により閉鎖し（以下「シーリング」と呼ぶ）、廃棄体の隔離性能を長期にわたって確保する必要がある。本年度の研究成果を以下に示す。

1)　礫ベントナイト混合土の基礎的な物性（締固め特性、透水特性、膨潤特性、熱特性）を、その混合比を変化させて取得し、既存の知見とともに、礫ベントナイト混合土の諸物性を検討した。

2)　シーリングシステム（埋戻し材、プラグ、グラウトからなる）の性能を評価するために核種の移流、拡散、吸着、放射性崩壊等の過程を考慮できる核種移行解析を実施した。

3)　カナダのＵＲＬサイトにおける立坑シーリング試験の設計を行い、具体的な試験項目を抽出するとともに、試験対象を選定し、全体の施工工程を設定した。

本報告書は、鹿島建設株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。
契約番号：060D0173
事業団担当部課室および担当者　東海事業所　環境技術開発部　地層処分開発室　室長　間野　正
*　鹿島建設（㈱）技術研究所
**　鹿島建設（㈱）建設総事業本部　土木設計本部
***鹿島建設（㈱）建設総事業本部　原子力室

COMMERCIAL PROPRIETARY
PNC ZJ1100 95-001
FEBRUARY, 1995

Investigation on Sealing in Geological Disposal

K. Aoki*, K. Hibiya*, Y. Shiogama*, M. Toida*,
E. Fukazawa*, K. Taira*, T. Tanaka*,
T. Kubota**, Y. Shimizu**, K. Okutsu**, N. Shiozaki**,
M. Furuichi***

Abstract

For the geological disposal of high level radioactive wastes, after placement of the wastes, it is necessary to close off (to be called "sealing" hereafter) the underground potential passages (disposal pits, disposal tunnels, liaison tunnel and construction tunnels)with an effective combination of engineered barriers such as buffers, backfilling materials, plugs and grout. It is necessary to ensure the long-term liability to isolate disposed wastes in the system.

The results of the research works this year are as follows ;

1) Comprehensive data of bentonite-sand mixture with gravel, whose maximum gravel size is 20 mm, are collected to evaluate basic characteristics such as compaction, permiation, swelling properties and thermal properties. With some relevant knowledge, these characterristics under varying mixing rate of bentonite-sand mixture with gravel are discussed.

2) In order to estimate the performance of sealing system which consists of backfilling materials, plugs and grout, a nuclide transport analysis was carried out. In this analysis, process of advection, diffusion, absorption and radioactive decay were considered.

3) The design of shaft sealing experiments at URL site are executed. The main objectives are to select appropriate testing methods, and make up the arrangement for experiments and the experiment schedule.

Work performed by KAJIMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.
PNC Liaison : Geological Isolation Technology Section, Waste Technology Development Division, Tokai Works, Tadashi Mano
* : Kajima Technical Research Institute
** : Kajima Corporation, Civil Engineering Disign Dept.
*** : Kajima Corporation, Nuclear Power Dept.

目　　次

1．研究の目的および範囲 …… 1－1
1.1　目　的 …… 1－1
1.2　研究の範囲 …… 1－1
1.3　研究の内容 …… 1－1

2．材料の特性評価 …… 2－1
2.1　使用材料 …… 2－1
2.2　配合条件 …… 2－2
2.3　試験項目 …… 2－2
2.4　締固め試験 …… 2－3
2.4.1　試験方法 …… 2－3
2.4.2　試験結果 …… 2－3
2.5　締固め透水試験 …… 2－5
2.5.1　試験方法 …… 2－5
2.5.2　試験結果 …… 2－5
2.6　膨潤圧試験 …… 2－7
2.6.1　試験方法 …… 2－7
2.6.2　試験結果 …… 2－7
2.7　熱特性試験 …… 2－9
2.7.1　測定理論の概略 …… 2－9
2.7.2　試験方法 …… 2－11
2.7.3　試験結果 …… 2－12
2.8　まとめ …… 2－16

3．シーリング性能の評価手法の検討 …… 3－1
3.1　目　的 …… 3－1
3.2　検討内容 …… 3－1
3.3　浸透流解析 …… 3－2
3.3.1　解析モデル …… 3－2
3.3.2　解析手法 …… 3－4
3.3.3　解析ケース …… 3－4
3.3.4　解析結果 …… 3－6

3.4　核種移行解析 …… 3－8
3.4.1　解析モデル …… 3－8
3.4.2　解析手法 …… 3－8
3.4.3　解析ケース …… 3－9
3.4.4　解析結果 …… 3－10
3.5　まとめ及び今後の課題 …… 3－16
3.5.1　まとめ …… 3－16
3.5.2　今後の課題 …… 3－17
参考文献 …… 3－18

4．原位置試験設計 …… 4－1
4.1　試験サイトの概要 …… 4－1
4.1.1　試験サイトの位置 …… 4－1
4.1.2　試験サイトの地質 …… 4－2
4.2　原位置試験方法の検討 …… 4－3
4.2.1　原位置試験の背景 …… 4－3
4.2.2　原位置試験での評価項目 …… 4－3
4.3　原位置試験の概念（立坑シーリング試験） …… 4－4
4.3.1　試験の仕様 …… 4－4
4.3.2　試験方法 …… 4－4
4.3.3　試験手順と工程 …… 4－7
4.3.4　施工順序を変えた場合の試験概要 …… 4－15

図　一　覧

2　章

図－2.1　粒度分布

図－2.2　締固め曲線

図－2.3　ρ_{dmax}とw_{opt}とベントナイト混合率の関係

図－2.4　透水係数とベントナイト配合率の関係

図－2.5　膨潤圧試験の概念図

図－2.6　膨潤圧と経過時間の関係

図－2.7　膨潤圧とベントナイト配合率の関係

図－2.8　熱伝導率測定法概略図

図－2.9　温度伝導率測定法概略図

図－2.10　$\dfrac{\theta_1-\theta_0}{2(\theta_0'-\theta)}$ ～ t の関係

図－2.11　熱伝導率測定装置

図－2.12　温度伝導率測定装置

3　章

図－3.1　解析モデル

図－3.2　プラグ部構造

図－3.3　CASE-10（評価ベース）のモデル図

図－3.4　CASE-11のモデル図

図－3.5　CASE-12～CASE-16のモデル図

図－3.6　浸透流解析結果

図－3.7　CASE-21～CASE-24のモデル図

図－3.8　CASE-21とCASE-24の核種移行解析結果（100万年後）

図－3.9　CASE-21とCASE-20の核種移行解析結果（100万年後）

図－3.10　CASE-24とCASE-34の核種移行解析結果（100万年後）

図－3.11　CASE-24とCASE-44の核種移行解析結果（100万年後）

4　章

図－4.1　ＵＲＬの構造

図－4.2　ＵＲＬの構造（240ｍレベルと420ｍレベル）

図－4.3　ＵＲＬ付近の地質概要

図－4.4　シーリング性能試験の概念

図－4.5　シーリング試験のフロー

図－4.6　計測用ボーリング孔のレイアウト（オプション）
図－4.7　施工手順（オプション）
図－4.8　試験手順及び工程（オプション）
図－4.9　施工手順
図－4.10　試験手順及び工程
図－4.11　施工手順（オプション）
図－4.12　試験手順及び工程（オプション）
図－4.13　施工手順
図－4.14　試験手順及び工程

表 一 覧

2 章

表－2.1　使用材料
表－2.2　配合条件
表－2.3　試験項目
表－2.4　礫ベントナイト混合土の締固め試験結果
表－2.5　礫ベントナイト混合土の締固め透水試験結果
表－2.6　礫ベントナイト混合土の膨潤圧試験結果
表－2.7　熱伝導率測定結果（比較法）
表－2.8　熱伝導率測定結果（迅速熱伝導率計）
表－2.9　温度伝導率測定結果
表－2.10　比較計算結果
表－2.11　試験結果一覧表

3 章

表－3.1　解析物性値
表－3.2　解析ケース
表－3.3　解析物性値
表－3.4　解析ケース
表－3.5　解析結果の比較内容

4 章

表－4.1　シーリング試験における評価項目と原位置試験

1．研究の目的および範囲

1.1　目　的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体の定置後、処分のために掘削した地下構造物を人工バリア材の一つである埋戻し材、プラグ材、グラウト材等により閉鎖し（以下「シーリング」と呼ぶ）、廃棄体の隔離性能を長期にわたって確保する必要がある。

シーリング研究開発としては、候補材料の基本特性に関する試験や、シーリングに係わる現象シナリオについての検討を行ってきた。今後は前年度までの成果を踏まえ、わが国の地質環境条件に適応しうるシーリングシステムの確立に資するため、材料特性の詳細な評価検討を行うと共に、シーリングシステムに関する工学規模の室内試験および原位置試験を実施して、シーリング性能に係わる現象をモデル化して長期挙動を予測する解析評価手法の開発、並びに設計・施工技術の開発を実施する必要がある。

本年度は、粘土系材料に岩盤掘削ずり等を混入した複合材料の特性評価を実施すると共に、シーリング性能の評価手法の検討を継続して実施した。また、今後必要なシーリングに関する原位置試験の設計検討を行った。

1.2　研究の範囲

(1)　材料の特性評価

(2)　シーリング性能の評価手法の検討

(3)　原位置試験設計

(4)　報告書の作成

1.3　研究の内容

(1)　材料の特性評価

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるシーリング材に関しては、これまで候補材料であるベントナイト単体、あるいは砂とベントナイトを混合したベントナイト混合土について、それらの基本物性に関する試験等を実施してきた。

本年度は、これら粘土系材料に岩盤掘削ずり等を混入した複合材料である「礫ベントナイト混合土」のシーリング材としての特性を評価することを目的として、室内試験を実施した。

a. 使用材料

使用する材料は、以下に示すとおりである。

- ベントナイト：クニゲルＶ１
- 骨材：粗骨材（砕石：最大骨材寸法20㎜）、粗骨材混合率50％

細骨材（ケイ砂６号）

○　砕石は、一般的に原石をクラッシャーで破砕して製造される。今回使用する砕石は、ＪＩＳ規格を満足する最大骨材寸法20㎜のもので、岩種は青梅岩の硬質砂岩である。

○　砂はこれまでの研究で使用しているケイ砂６号であり、最大骨材寸法２㎜以下のものである。

b. 試験条件および試験項目

試験条件および試験項目は以下の表に示すとおりである。

試験項目	ベントナイト混合率（%）					試験条件
	5	10	15	20	50	
締固め試験	○	○	○	○	○	含水比６水準
締固め透水試験	○	○	○	○	○	最適含水比
膨潤圧試験			○		○	最適含水比
熱伝導率試験	○		○		○	最適含水比

○　配合については、乾燥密度が大きく、かつ透水係数が小さくなることを考え、粗骨材混合率を50%に固定し、残りの50%をベントナイトと細骨材とする。たとえば、ベントナイト混合率15%の場合は、粗骨材50%：細骨材35%：ベントナイト15%となる。

○　試験要領

①　締固め試験

ＪＩＳ　A1210に基づき、締固めエネルギーは１kg/cm/cm³（１ＥＣ）（ランマー2.5kgf、落下高さ30cm、25回ずつ３層に分けて締固め）とし、モールドは締固めモールド（φ100㎜、ｈ127㎜）を使用する。

この試験は、礫ベントナイト混合土が最も密に締固められる最適含水比を求めるために行なう。

②　締固め透水試験

締固め試験で求められた最大乾燥密度、最適含水比の条件で、①と同様に締め固める。試験体寸法は同じくφ100㎜×ｈ127㎜である。

締固め透水試験はＪＩＳ　A1218に準拠して実施する。試験体の飽和は、真空度を高めてから吸水させて行なう。透水圧を徐々に高め、最終的に２kgf/cm²程度の透水圧をかけて透水係数を測定する。

③　膨潤圧試験

締固め試験で求められた最大乾燥密度、最適含水比の条件で①と同様に締固め

る。試験体寸法はφ150mm×h50mmとした。

膨潤圧試験は、変位制御で圧力を測定する方式で、鉛直方向の圧力を測定した。供試体は圧密試験用のモールド（φ150mm、h50mm）を使用する。

④ 熱伝導率試験

礫ベントナイト混合土の場合は、礫があるためプルーブ法では精度良く測定ができないため、ＪＩＳ A1412（平板比較法）に準拠して実施する。試験体寸法はφ300mm、h50mmとする。

(2) シーリング性能の評価手法の検討

シーリングシステム（埋戻し材、プラグ、グラウトからなる人工バリア）が合理的に目標を達成できるか、予め解析的に予測する必要がある。

本年度はシーリング性能を評価するために核種の移流、拡散、吸着、放射性崩壊等の過程を考慮できる核種の移行解析を実施した。

a. 解析モデル

解析は岩盤、埋戻し材、プラグ、グラウト、ゆるみ域を考慮した軸対象モデルとし、解析領域は深さ1,000m、半径500mとした。なお、浸透流は上向きの動水勾配を考慮した。

b. 解析コード

動燃殿保有３次元地下水流・核種移行解析コードFEMCOUP/MIGRATIONと同等のコードを用いた。

c. 解析条件

対象核種はNp-237（半減期は2,140,000年）とした。

解析物性値を以下に示す。

	透水係数 (cm/s)	単位体積重量 (t/m³)	間隙率	分配係数 (m³/kg)	拡散係数 (m²/sec)
岩盤（健全部）	10^{-6}	2.7	0.01	0.001	5×10^{-10}
岩盤（ゆるみ域部）	10^{-4}	2.7	0.05	0.001	5×10^{-10}
岩盤（グラウト部）	10^{-6}	2.7	0.05	0.001	5×10^{-10}
プラグ	10^{-8}	2.0	0.4	0.16	5×10^{-11}
埋戻し材	10^{-7}	2.0	0.3	0.16	5×10^{-11}

d. 解析ケース

解析ケースは以下の５ケースとする。

	CASE番号				
	①	②	③	④	⑤
プラグ個数	0	1	2	3	3
動水勾配	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001

その際、ゆるみ域の影響についても考慮する。

(3) 原位置試験設計

空洞掘削時の湧水対策や人工バリア、立坑等の周辺岩盤の透水性を低く抑えるために用いられる重要なシーリングに関する原位置試験の設計検討を実施した。

a. 対象岩盤

対象とする岩盤は堅硬な花崗岩で低透水性のものとし、具体的にはカナダのＵＲＬサイトを想定する。

b. 検討対象とする試験の種類

設計検討の対象とする原位置試験の種類は以下のとおりである。

① 空洞掘削の影響

② プラグ材料の性能確認

③ 埋戻し材料の性能確認

④ グラウトの効果確認

⑤ 上記①～④から構成される全体システムの性能確認

c. 設計検討項目

上記に示した５種の試験ごとに設計検討を行う項目は下記のとおりである。

① 具体的な試験項目の抽出

② 各試験の実施方法の概要

③ 各試験の実施に必要な概略期間

2. 材料の特性評価

本年度の試験では、対象を処分場のシーリング要素を構成する緩衝材や埋戻し材に限定することなく、粘土系材料に岩盤掘削ずり等を混入した複合材料である「礫ベントナイト混合土」の特性を評価する。

2.1 使用材料

表2.1に試験に用いる使用材料を示す。粘土材料は、山形県産のNaベントナイト(クニゲルV1)、岩盤掘削ずりの代用は、コンクリート用粗骨材(礫：最大骨材寸法20mm)及び砂(珪砂6号：最大粒径約1mm)を用いた。図2.1に各々の粒度分布を示す。

表2.1 使用材料

材料	内容	土粒子の密度 $\rho s(g/cm^3)$
礫(G)	コンクリート用粗骨材 (砕石2005)	2.664
砂(S)	珪砂6号	2.680
ベントナイト (B)	クニゲルV1 (クニミネ工業製)	2.736

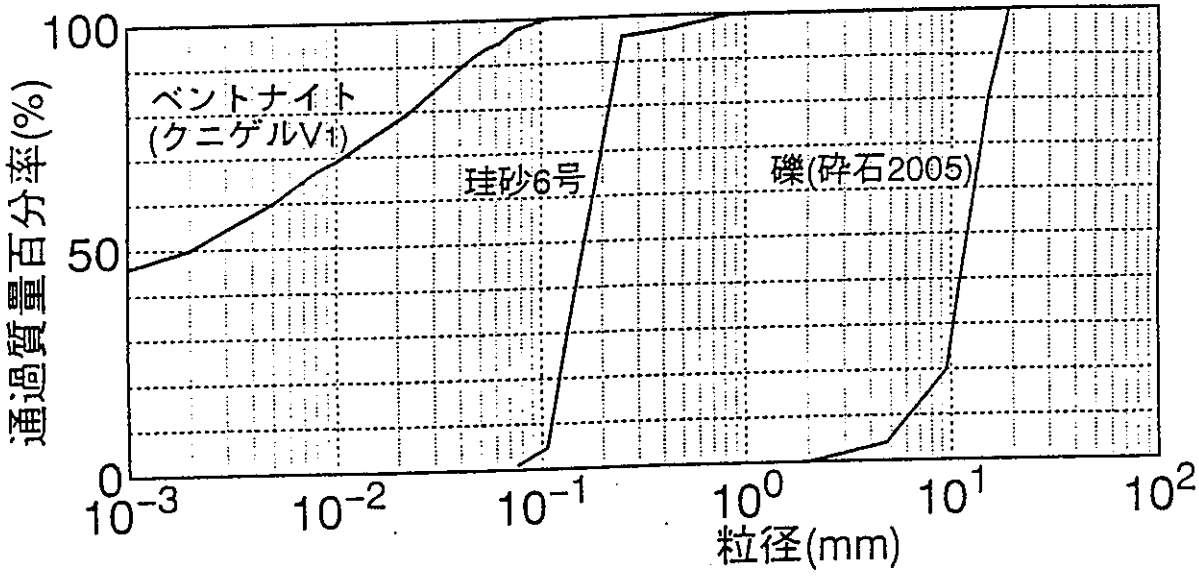


図2.1 粒度分布

2.2 配合条件

礫ベントナイト混合土の基本特性は、礫、砂及びベントナイトの混合率によって大きく変わってくる。

表2.2に今回の試験で実施した配合条件を示す。

礫配合率は、既往の研究から乾燥土重量比で50%として、残り50%を砂とベントナイトとした。ベントナイトは0、5、10、15、20、50%と変化させた。

表2.2　配合条件

No.	礫	砂	ベントナイト
1	50	45	5
2		40	10
3		35	15
4		30	20
5		0	50

（乾燥土重量比：%）

2.3 試験項目

礫ベントナイト混合土の基礎特性として、透水性、強度特性、膨潤性、圧密特性、熱特性など、種々の特性が考えられるが、今回の試験では、そのうちの締固め特性、透水性、膨潤性及び熱特性の４項目を採り上げ、表2.3に示す試験項目を実施した。

表2.3　試験項目

ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ混合率(%) / 試験項目	0	5	10	15	20	50	試験条件
締固め試験	○	○	○	○	○	○	含水比６水準
締固め透水試験	○	○	○	○	○	○	最適含水比
膨潤圧試験				○		○	最適含水比
熱伝導率試験		○		○		○	最適含水比
温度伝導率試験		○		○		○	最適含水比

2.4 締固め試験

礫ベントナイト混合土の最大乾燥密度ρ_{dmax}及び最適含水比w_{opt}を求めるために、締固め試験を実施した。

2.4.1 試験方法

試験はJIS A 1210(突き固めによる土の締固め試験方法)[3]に準拠し、締固め方法は内径10cmのモールドを用いた第1法で行い、試料の準備および試験方法は、非乾燥法で非繰返し法とした。

2.4.2 試験結果

図2.1にベントナイト配合率を0～50%に変化させたときの礫ベントナイト混合土の締固め曲線を示す。表2.2に締固め曲線から得られた最大乾燥密度ρ_{dmax}と最適含水比w_{opt}を示す。また、これらの結果を整理したものとして、図2.5にρ_{dmax}とw_{opt}とベントナイト配合率の関係を示す。図中にはシーリング研究Ⅲ(珪砂とベントナイトの混合土)の結果[4]も併記する。

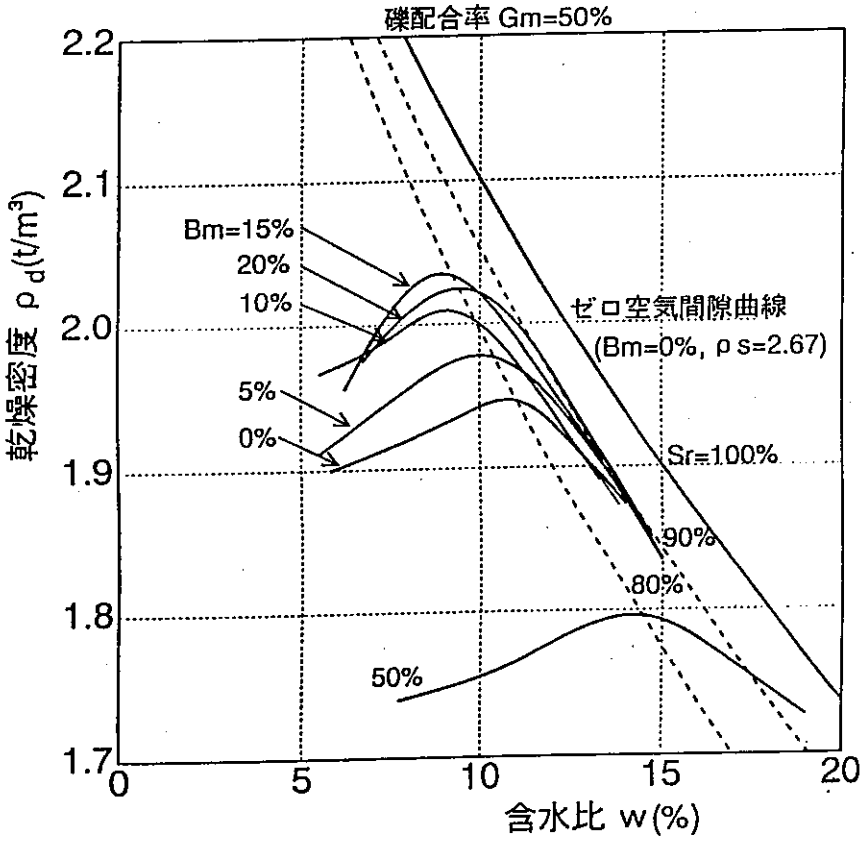


図2.1　礫ベントナイト混合土の締固め曲線

表2.4　礫ベントナイト混合土の締固め試験結果

礫（%）	ベントナイト（%）	最大乾燥密度 ρ_{dmax}(t/m^3)	最適含水比 w_{opt}(%)
50	0	1.946	11.1
	5	1.978	10.1
	10	2.010	9.2
	15	2.036	8.9
	20	2.027	9.5
	50	1.796	14.5

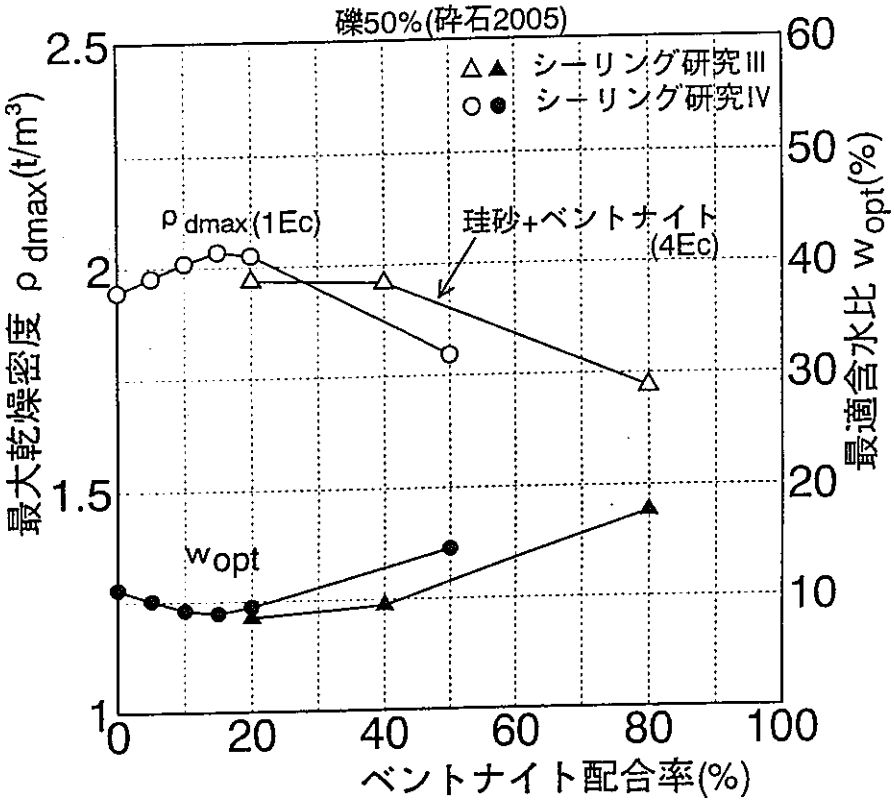


図2.2　ρ_{dmax}とw_{opt}とベントナイト配合率の関係

これらの結果から、最大乾燥密度ρ_{dmax}は、ベントナイト配合率の増加に伴って増加しており、ベントナイト配合率15%のときに最大値(2.036t/m^3)をとる。しかし、ベントナイト配合率15%を越えると減少する傾向を示す。また、最適含水比w_{opt}はρ_{dmax}の増加に伴って、乾燥側に移行しており、ベントナイト配合率15%のときに最小値(8.9%)となる。

平成5年度実施したシーリング研究Ⅲの締固め試験結果を同じベントナイト配合率20%で比較した場合、珪砂とベントナイトの混合土はρ_{dmax}=1.97t/m^3, w_{opt}=8.5%の値を得ており、礫ベントナイト混合土と同等の締固め特性を得ている。しかし、このときの締固めエネルギーは、本試験での1Ec(≒5.6cm・kgf/cm^2)に対して、4Ec(≒22.4cm・kgf/cm^2)で行った結果であり、同じ1Ecの締め固めエネルギーで比較した場合には、礫ベントナイト混合土の方が高い密度を得ることができる材料であると考えられる。

2.5 締固め透水試験

各配合条件での最大乾燥密度・最適含水比で締固めた試料の透水係数を把握するために、締固め透水試験を行った。

2.5.1 試験方法

試験はJIS A 1218(土の透水試験方法)に準拠して実施した。

供試体は、締固め試験用モールドで、最大乾燥密度、最適含水比で締固めたもの(乾燥法、非繰返し法)をそのまま用い、真空飽和させた。

2.5.2 試験結果

表2.5に各ベントナイト配合率に対する透水試験結果を、図2.3に透水係数kとベントナイト配合率の関係を示す。測定時の通水圧は、ベントナイト配合率によって異なるが、0.2～3.2(kgf/cm^2)の範囲で行った。図中にシーリング研究Ⅲ(平成5年度)の結果も示す。

表2.5　礫ベントナイト混合土の締固め透水試験結果

礫(%)	ベントナイト(%)	透水係数 k(m/sec)	通水圧 P(kgf/cm^2)
50	0	3.6×10^{-6}	0.2
	5	3.0×10^{-8}	1.0
	10	1.3×10^{-11}	1.9
	15	6.1×10^{-12}	2.8
	20	4.1×10^{-12}	3.2
	50	2.8×10^{-12}	3.2

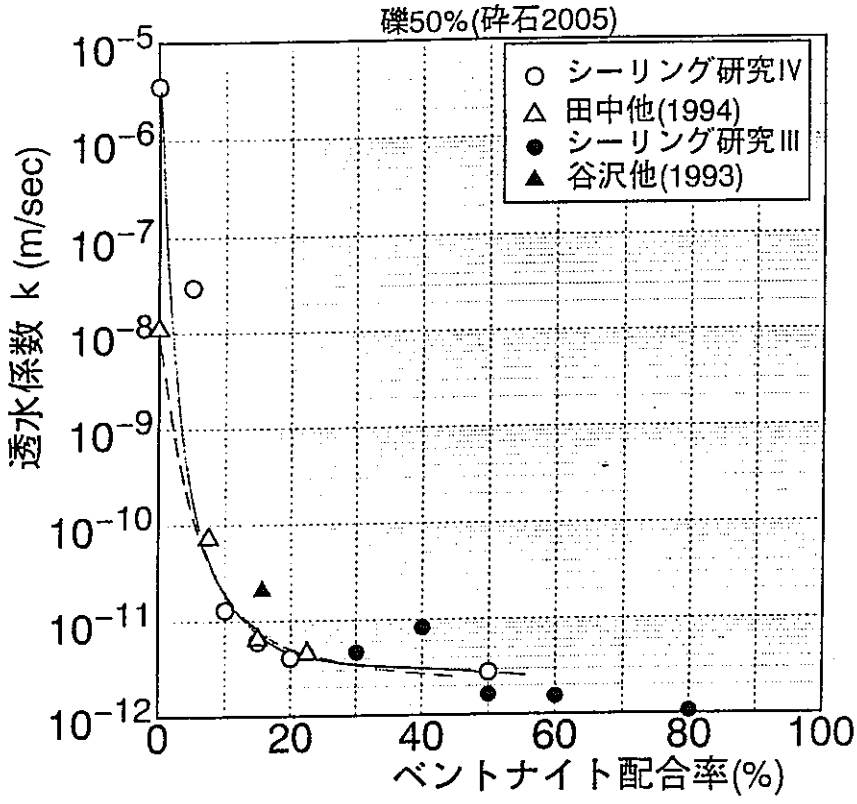


図2.4　透水係数とベントナイト配合率の関係

これらの結果から、透水係数は、ベントナイト配合率の増加に伴って減少する。その値は、ベントナイト配合率15%程度で10^{-12}m/secオーダーになり、それ以上ベントナイト配合率を増加させても大きくは変化しなかった。既往の田中他の研究結果と比較すると、使用している砂の種類が異なるので、ベントナイトを混入しない場合(ベントナイト配合率0%)の透水係数の値が異なっているが、ベントナイト配合率10%以上であれば、ほぼ同程度の透水係数をとっている。

平成５年度に実施したシーリング研究Ⅲの珪砂とベントナイト混合土では、ベントナイト配合率30～50%で、透水係数は10^{-12}m/secオーダーの値をとっている。また、谷澤らの研究結果では、砂とベントナイト混合土でベントナイト15%の場合、最適含水比より湿潤側の含水比での透水係数は2×10^{-11}m/secの結果が得られている。

例えば、目標透水係数を1×10^{-11}m/sec以下とした場合、礫ベントナイト混合土ではベントナイト15%で目標値を満足することができるが、珪砂とベントナイトの混合土では、30%以上必要となる。以上のことから、同じオーダーの遮水性が要求される場合には礫を混合した方がベントナイト量を少なくすることができ、コスト低減効果はあると考えられる。

2.6 膨潤圧試験

ベントナイト配合率15%と50%の場合の礫ベントナイト混合土の膨潤圧を求めるために、膨潤圧試験を行った。

2.6.1 試験方法

供試体は、直径15cm×高さ5cmのものを用いて、最大乾燥密度、最適含水比で締固めたもの(乾燥法、非繰返し法)をそのまま用い、真空飽和させた。図2.5に膨潤圧試験の概念図を示す。

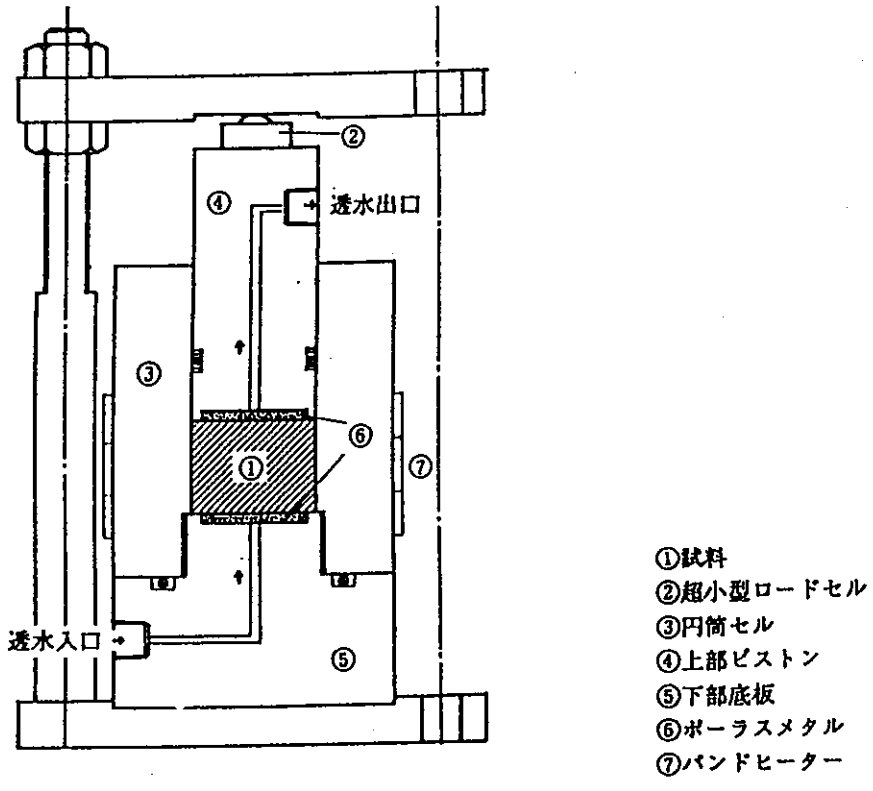


図2.5　膨潤圧試験の概念図

2.6.2 試験結果

表2.6に礫ベントナイト混合土の膨潤圧試験結果を示す。図2.6に膨潤圧と経過時間の関係を、図2.7に膨潤圧とベントナイト配合率の関係を示す。図中にシーリング研究Ⅲ(平成5年度)の結果も示す。

表2.6　礫ベントナイト混合土の膨潤圧試験結果

礫(%)	ベントナイト(%)	最大膨潤圧 Pmax(MPa)
50	15	0.22
	50	0.48

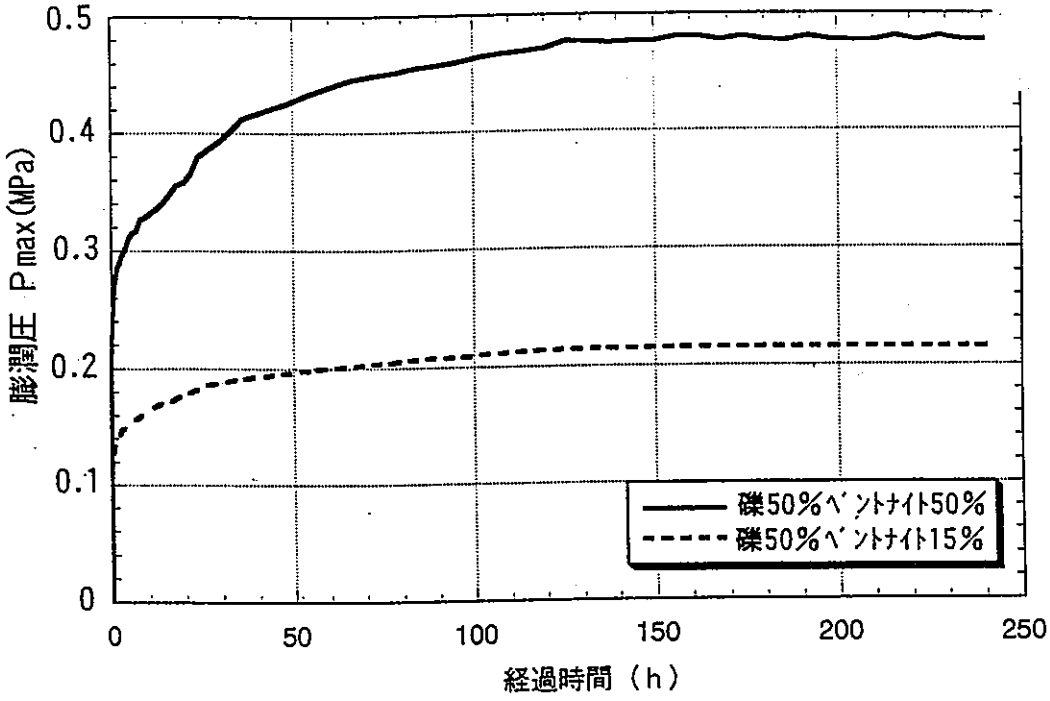


図2.6　膨潤圧と経過時間の関係

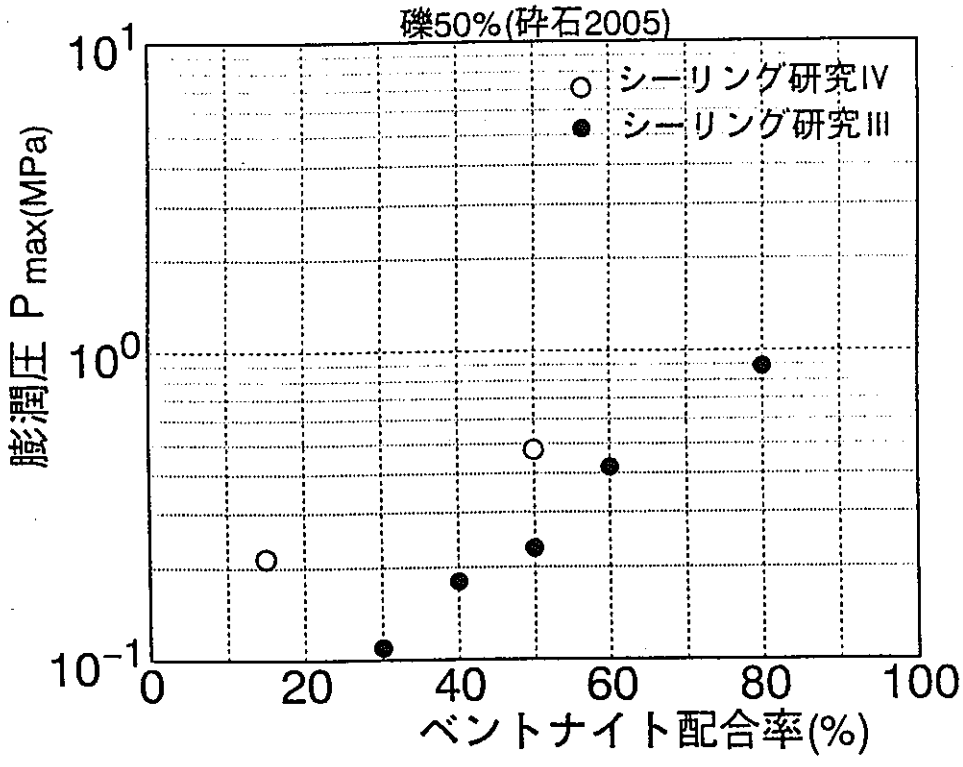


図2.7　膨潤圧とベントナイト配合率の関係

これらの結果から、膨潤圧は、吸水後１時間程度で収束値の50％程度まで上昇し、その後、徐々に増加し、100時間程度(およそ４日)でほぼ収束した。ベントナイト配合率が多くなると、膨潤圧は大きくなり、ベントナイト配合率15％のときの膨潤圧0.22MPaに対し、50％になると0.48MPaとなった。

平成５年度の珪砂とベントナイト混合土の膨潤圧試験と比較すると、ベントナイト配合率50％の場合膨潤圧0.23MPa、ベントナイト配合率30％の場合0.11MPaであり、今回の結果よりも小さい値をとっている。

その理由は、試験条件、すなわち試験方法、供試体寸法、含水比、骨材の種類等)が異なることにあり、その中でも最も影響するのは、供試体寸法が異なることであると考えられる。今後、データを増やして検討する予定である。

2.7 熱特性試験

礫ベントナイト混合土の熱特性(熱伝導等、温度伝導率、比熱）を把握するために、ベントナイト配合率15％と50％の場合について、熱伝導率試験及び温度伝導率試験を行い、その結果から熱伝導率、温度伝導率及び比熱を求めた。

2.7.1 測定理論の概略

(1) 熱伝導率試験

礫ベントナイト混合土の熱伝導率測定法には、礫を含有していりため、プローブ法による非定常熱流法(線熱源法)では測定できないため、比較法による定常熱流を採用した。また、結果の比較のため、非定常熱流法による迅速熱伝導率計でも測定した。

今回用いた定常熱流による比較法の理論の概略は次のとおりである。

すなわち、厚さｄの平板型試料（熱伝導率Ｋ）及び厚さｄ'の標準板（熱伝導率Ｋ'既知）を図2.11に示すように重ね合わせて使用し、試料(土)の一端をθ_1、標準板の一端をθ_3($\theta_3 < \theta_1$)になる一定温度に設定する。

この状態において試料と標準板との境界中央部Ａ点の温度をθ_2とすると、定常状態においては標準板への流入熱量と土からの流出熱量が等しいことから、

$$K\frac{(\theta_1-\theta_2)}{d}=K'\frac{(\theta_2-\theta_3)}{d'}$$

$$\therefore\quad K=\frac{K'd(\theta_2-\theta_3)}{d'(\theta_1-\theta_2)} \qquad (2-1)$$

ここで、ｄ＝0.05m, ｄ'＝0.01m, Ｋ'＝1.117w／(m•k)である。

したがって、図2.11の試料について定常状態におけるθ_1、θ_2およびθ_3を測定することにより土の熱伝導率Ｋを式(2－1)から求めることができる。

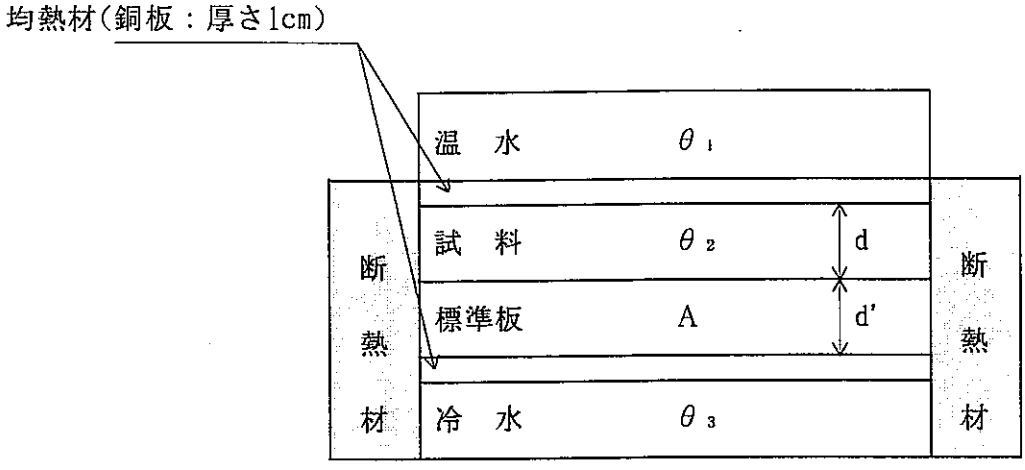


図2.8　熱伝導率測定法概略図

(2) 温度伝導率試験

温度伝導率λの測定には、平板型試料と平板断熱材を重ね合わせた物を使用した。

初期温度θ_0からなる試料の一端をθ_0'に設定した場合における、試料と断熱材との境界点Aの温度θの経時変化を測定することにより、間接的に試料の温度伝導率を算出した。

この測定法理論の概略は次のとおりである。

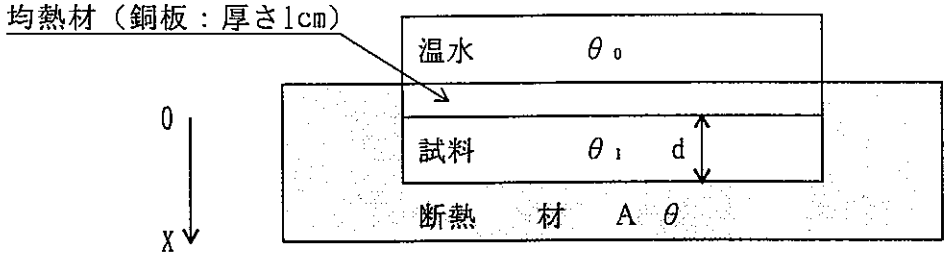


図2.9　温度伝導率測定法概略図

図2.9において X 軸方向の一次元熱伝導方程式

$$\frac{d\theta}{dt} = \lambda \frac{d^2\theta}{dX^2} \qquad (2\text{-}2)$$

に初期条件 $t=0$, $\theta=\theta_0$と境界条件 $X=0$, $\theta=\theta'_0$を与えて解き、近似して整理すると、式(2-3)に表すことができる。

$$\frac{\theta_1-\theta_0}{2(\theta_0'-\theta_0)} = \mathrm{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{\lambda t}}\right) - \mathrm{erfc}\left\{\frac{3}{2\sqrt{\lambda t}}d\right\} \qquad (2\text{-}3)$$

あらかじめλの値を0.0005～0.003まで仮定して式（2－3)の右辺の誤差関数を算出し、時間ｔとの関係を図2－10のようにプロットしておく。

一方、測定結果から $\dfrac{\theta_1-\theta_0}{2(\theta_0'-\theta)}$ とｔとの関係をプロットし、図2.10を重ね合わせることにより、図2.10の中で近い曲線を求め、λを決定する。

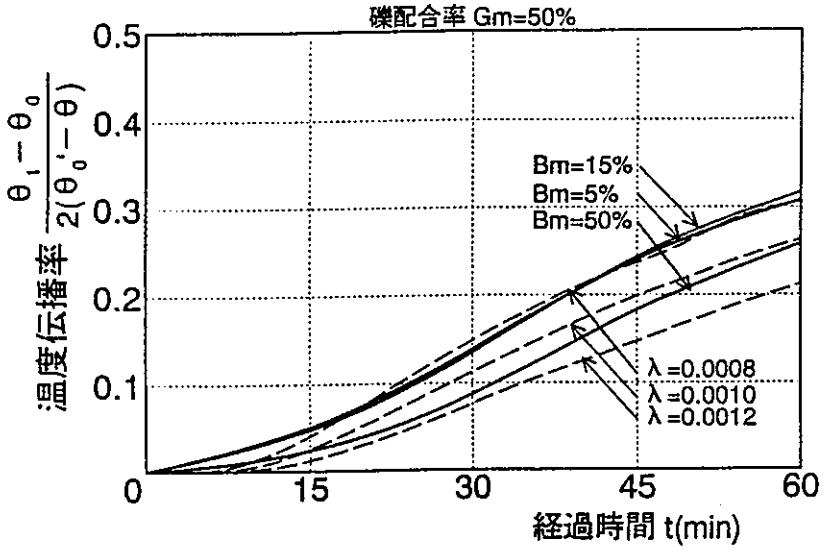


図2.10 $\dfrac{\theta_1-\theta_0}{2(\theta_0'-\theta)}$ ～ｔの関係

2.7.2 試験方法

（1）配合条件

配合条件は、ベントナイト配合率5，15，50％の礫ベントナイト混合土とした。

（2）実験装置

① 熱伝導率および温度伝導率測定装置

熱伝導率および温度伝導率測定装置は図2.8、2.9に示すように恒温水槽、低温水槽、恒温制御装置および温度測定装置により構成されている。

② 試料容器（熱伝導率測定の場合）

試料容器は、周囲を断熱材で保護した円筒形とした。また、供試体内各点の温度を測定するために熱電対を断熱材中を通して測点の先端が供試体の中央にくるようにセットした。熱電対測定用試料は、上方の均熱材と下方の均熱材の上部に設けた標準板との間に設置した。試料は均熱材としての銅板を通して加熱し、下端は冷水によって冷却するようにした。したがって、熱流は上方の均熱材から試料ならびに標準板を通って、下方部の均熱材へと流れることになる。

使用した均熱材および標準板の詳細は次のとおりである。

a. 均熱材

試料を直接加熱したり、標準板を直接冷却しても温度制御が十分できず、表面

温度を均一に保持することが出来ないので、表面を平坦に磨いた厚さ10mmの銅板を上下面に設けた。

b. 標準板

今回使用した標準板は、あらかじめ測定温度内での熱伝導率が判っているもので、実験材とあまり熱伝導率の差がないパイレックスガラスを使用した。

標準板は厳密に、あらかじめ実験室で検定した。

③試料容器（温度伝導率測定の場合）

試料容器の概略は、熱伝導測定装置と同じく周囲を断熱材で囲み円筒形としたが、熱伝導測定装置と異なる点は、上部均熱材側のみから加熱するため下部を断熱材で被覆して、底を閉じた状態にしたことである。供試体内各点の温度を測定するため、あらかじめ熱電対を断熱材中に通して、測点の先端が容器の中央にくるようにセットした。試料は、この下部の断熱材と上部の均熱材との間に設置した。したがって、熱流は上部の銅板を通して加熱してあるので、試料中を通して下部の断熱材へ流れることになる。

(3) 供試体の作成

試料の容器内に試料を充填するに当たり、少しづつ試料を所定の密度と同密度になるよう容器内にランマーで締め固め、表面は平坦になるように仕上げた。

供試体寸法は、礫径を考えて、D=300mm、d=50mmとした。

(4) 実験方法

試料を常温(＋20℃程度)の室内で試料容器内にセットした後、設定温度を次のように設定して、温度測定を行った。

① 熱伝導率測定の場合　＋50℃　低温側＋5℃

② 温度伝導率測定の場合　＋50℃

2.7.3 試験結果

(1)熱伝導率

表2.7に比較法による熱伝導率測定結果、表2.8に迅速熱伝導率計による測定結果を示す。図2.11に熱伝導率Kとベントナイト配合率の関係を示す。図中にはシーリング研究Ⅱの測定結果も示す。

その結果、熱伝導率Kは1.013～1.848 W/mk(0.871～1.589Kcal/mh℃)であり、ベントナイト配合率が小さいほど大きい傾向になった。また、比較法により測定した熱伝導率は、迅速熱伝導率計よりやや大きい値が得られた。シーリング研究Ⅱで実施した珪砂とベントナイトの混合土の測定結果と比較すると、ベントナイト配合率が異なっているのるが、礫ベントナイト混合土の方が、礫を混入してため、熱伝導率は大きい値を得ていると考えられる。

表2.7　熱伝導率測定結果(比較法)

礫 %	ベントナイト %	個数 n	平　均 w／(m•k)	標準偏差 σ_{n-1}	変動係数 %
50	5	3	1.848	0.437	23.6
	15	3	1.678	0.151	9.1
	50	4	1.683	0.474	28.2

表2.8　熱伝導率測定結果（迅速熱伝導率計）

礫 %	ベントナイト %	個数 n	平　均 w／(m•k)	標準偏差 σ_{n-1}	変動係数 %
50	5	7	1.613	0.291	17.9
	15	7	1.642	0.264	16.1
	50	9	1.013	0.319	31.5

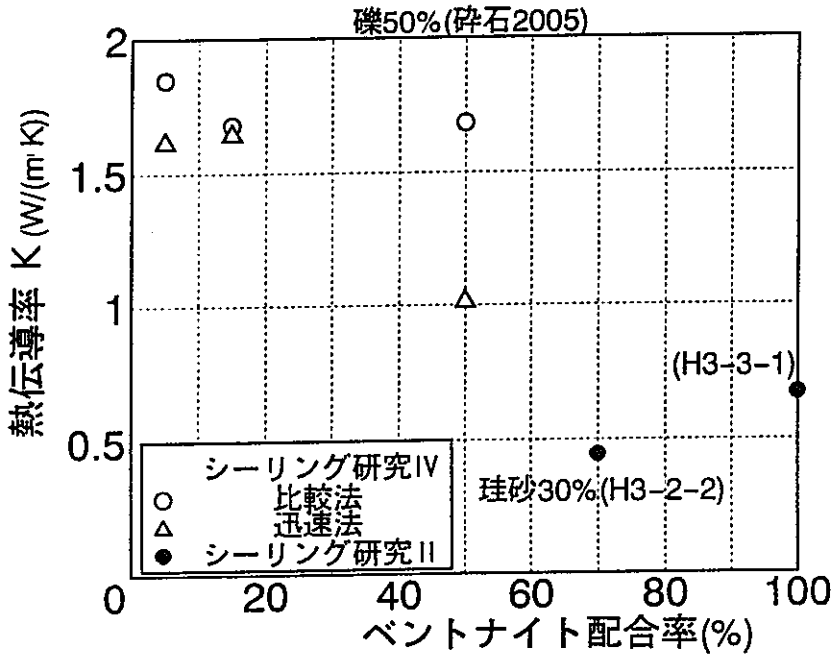


図2.11　熱伝導率Kとベントナイト配合率の関係

(2) 温度伝導率

表2.9に温度伝導率測定試験結果を、図2.12に温度伝導率λとベントナイト配合率の関係を示す。図中にはシーリング研究Ⅱの測定結果(計算値)も示す。

これらの結果から、温度伝導率λは1.3×10^{-7}～4.0×10^{-7} m^2/sec (0.0005～0.0015 m^2/hr)であり、ベントナイト配合率が大きくなると若干小さい値をとる傾向を示す。また、シーリング研究Ⅱの測定結果は、熱伝導率Kと比熱cから計算した値であり、今回の測定値より大きい値をとっている。

表2.9　温度伝導率測定結果

礫 %	ベントナイト %	個数 n	範囲 m^2/sec	平均 m^2/sec
50	5	7	2.22×10^{-7}～4.17×10^{-7}	2.78×10^{-7}
	15	9	2.22×10^{-7}～4.17×10^{-7}	2.78×10^{-7}
	50	9	1.39×10^{-7}～2.78×10^{-7}	2.22×10^{-7}

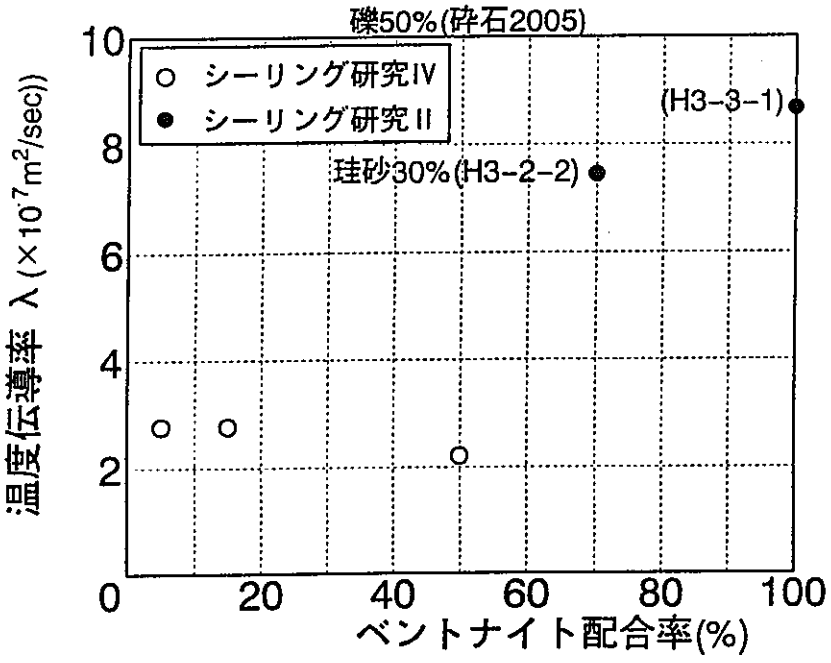


図2.12　温度伝導率λとベントナイト配合率の関係

(3)比熱

測定した熱伝導率K及び温度伝導率λから、比熱cを式(2.4)で求めた。

$$c = \frac{K}{\lambda \rho} \qquad (2.4)$$

ここに、ρ：試料密度

表2.10に比熱計算結果を示す。

これらの結果から、算定した比熱cは、2.7～3.7kJ/kg•kの範囲の値となった。比熱はベントナイト配合率が変化しても同程度の値をとっている。

表2.10　比熱計算結果

礫 %	ベントナイト %	熱伝導率K w/m•k	温度伝導率λ m^2/sec	比熱c kJ/kg•k
50	5	1.848	2.78×10^{-7}	3.052
	15	1.678	2.78×10^{-7}	2.725
	50	1.683	2.22×10^{-7}	3.680

2.8 まとめ

今回、粘土系材料に岩盤掘削ずり等を混入した複合材料である「礫ベントナイト混合土」の基礎的な特性を検討し、①～④の結果を得た。表2.11にこれらの結果を整理したものを示す。

①同じ締め固めエネルギーで比較した場合には、礫ベントナイト混合土の方が珪砂ベントナイト混合土に比べて、高い密度を得ることができる材料である。

②透水係数として1×10^{-11}m/sec以下の遮水性が要求される場合には、珪砂・ベントナイト混合土ではベントナイト配合率30%以上の必要なのに対し、礫ベントナイト混合土では15%以上あればよい。したがって、礫ベントナイト混合土は経済性に優れている。

③膨潤圧は、礫ベントナイト混合土の方が珪砂ベントナイト混合土よりも大きくなったが、試験条件も異なることから、今後データを詳しく検討する必要がある。

④礫ベントナイト混合土は、礫が入っているため、珪砂ベントナイト混合土よりも熱が伝わりやすい。

表2.11　試験結果一覧表

	特性	性能値	礫ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ	珪砂ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ
①	締固め特性	$\rho d=2.0t/m^3$	締固めｴﾈﾙｷﾞｰ1Ec	締固めｴﾈﾙｷﾞｰ4Ec
②	遮水性	$k<1\times10^{-11}$m/sec	ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ15%以上	ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ30%以上
③	膨潤特性	ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ50%	0.49MPa	0.23MPa
④	熱伝導特性	K	1.5～2.0	0.4～0.7

3．シーリング性能の評価手法の検討

3.1 目的

処分場の性能評価上、基本シナリオとなる地下水挙動を把握することは、処分システムの構築上重要な課題の一つである。昨年度までに処分場の建設に伴う地下水挙動（地下水低下及び再冠水）の評価を行い、処分場周辺の地下水挙動を概略把握することができた。

今後、シーリングシステム（埋戻し材、プラグ、グラウトからなる人工バリア）が合理的に目標を達成できるか確認するためにはさらに正確に地下水挙動を予測する必要がある。

本年度はシーリング性能を評価するために浸透流解析及び核種の移流、拡散、吸着、放射性崩壊等の過程を考慮できる核種移行解析を実施する。

3.2 検討内容

地下の処分坑道から漏洩した核種が地表面まで到達するまでの時間を指標として期待されるシーリング性能を設定し、それを満足するシーリング概念を構築する。

検討は以下の解析により行う。

① 浸透流解析

プラグの深さ方向の位置及びプラグの個数、また動水勾配をパラメーターとして軸対称定常浸透流解析を実施し、それにより核種到達時間を比較検討する。

② 核種移行解析

①の浸透流解析と同様にパラメータ解析を実施し、放射能濃度の面からシーリング概念の有効性を検証する。解析は浸透流解析と同様に軸対称解析として行う。

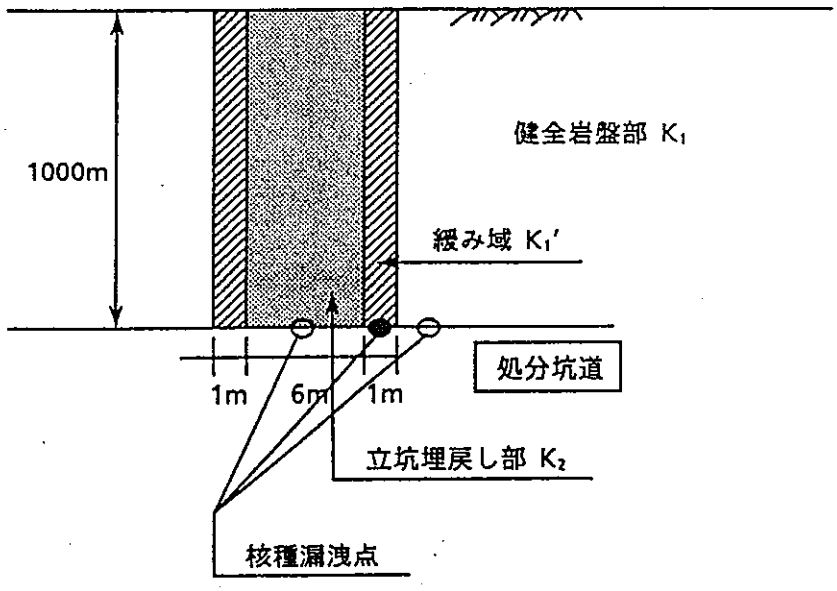
3.3 浸透流解析

3.3.1 解析モデル

解析モデル図－3.1に示す。

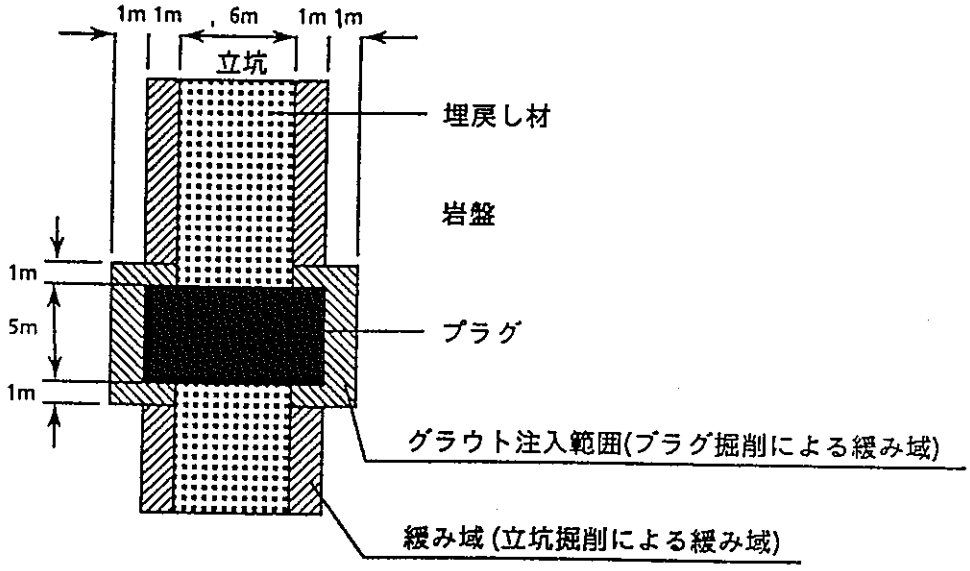
動水勾配は動燃殿の委託研究[1]より上向きに i ＝0.01とする。解析領域は動燃殿の解析結果[2]より深度×水平距離＝1000m×500mとする。

境界条件はモデル境界上部を全水頭０ｍ，モデル下部境界を全水頭一定，側方境界を不透水と設定する。



図－3.1　解析モデル

本解析では動燃殿の解析結果[2)]をふまえてプラグ長を５ｍとする。



図－3.2　プラグ部構造

解析物性値を表－3.1に示す。

表－3.1　解析物性値

	透水係数 (cm/s)
岩盤（健全部）	10^{-6}
岩盤（ゆるみ域部）	10^{-4}
岩盤（グラウト部）	10^{-5}
プラグ	10^{-9}
埋戻し材	10^{-7}

3.3.2 解析手法

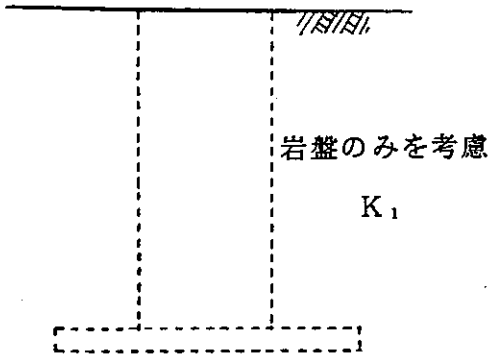
解析は通常の非圧縮条件下の浸透流解析とし、有限要素法を用いて定式化する。

3.3.3 解析ケース

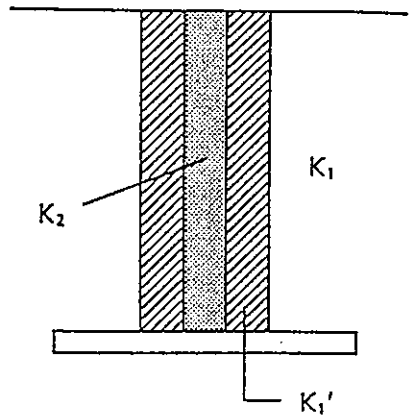
表-3.2に解析ケースを示す。解析ケースは評価ベースの他に以下に示すシーリング方法を設定する。図-3.3～図-3.5にCASE-10～CASE-16のモデル図を示す。

表-3.2　解析ケース

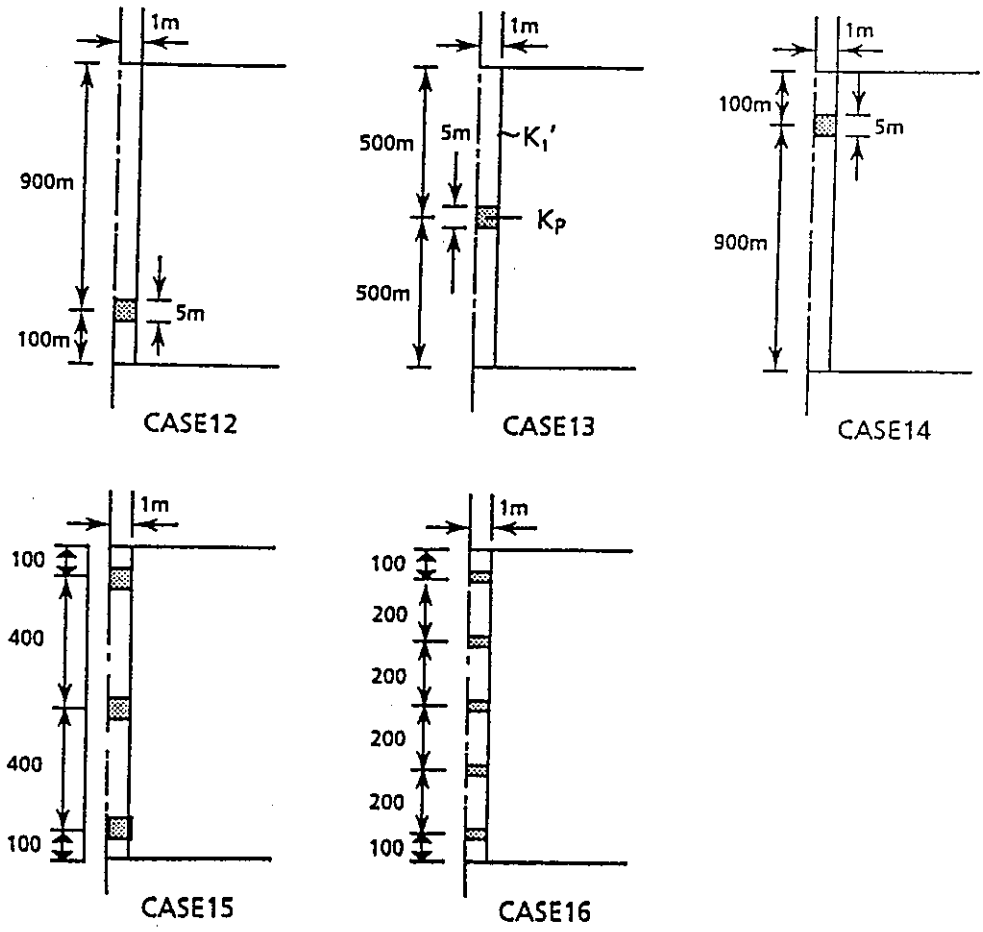
	透水係数					プラグ個数	参照図
	岩盤	緩み域	埋戻し材	グラウト注入範囲	プラグ		
	K_1	K_1'	K_2	K_G	K_P		
CASE-10（評価ベース）	10^{-6}			－	－	岩盤のみ	図－3.4
CASE-11	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	－	－	0	図－3.5
CASE-12	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-9}	1	図－3.6
CASE-13	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-9}	1	
CASE-14	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-9}	1	
CASE-15	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-9}	3	
CASE-16	10^{-6}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-5}	10^{-9}	5	



図－3.3　CASE-10（評価ベース）のモデル図



図－3.4　CASE-11のモデル図



図－3.5　CASE-12～CASE-16のモデル図

3.3.4 解析結果

浸透流解析の結果を図－3.6に示す。

解析結果より以下のことが確認できた。

・岩盤のみの場合(CASE-10)とCASE-11～CASE-16の場合とでは到達時間が大きく異なり、岩盤のみの場合が100倍ほど時間が長いことが確認できる。
CASE-11～CASE-16の場合の地下水の水粒子はゆるみ域を通る。本解析の岩盤の透水係数は岩盤のゆるみ域の10^{-2}倍であるので、ダルシー法則により時間は100倍長くなる。

・CASE-11は埋戻し材、ゆるみ域、岩盤を考慮し、CASE-12～CASE-16は埋戻し材、ゆるみ域、プラグ、グラウト、岩盤を考慮してプラグの設置深度や個数を変えて解析した結果である。解析結果よりプラグによる効果はほとんど無いことがわかる。プラグの透水係数は$k=10^{-8}$(cm/s)と小さいがプラグの高さを5mと設定しているため、ゆるみ域では地下水の流速はゆるみ域の透水係数のみに依存すると考えられる。

・CASE-10、CASE-11、CASE-14～CASE-16の場合について動水勾配をi=0.01とi=0.001の２ケースの解析を行った。ダルシーの法則より動水勾配がi=0.001の到達時間がi=0.01の場合の10倍長くなる。

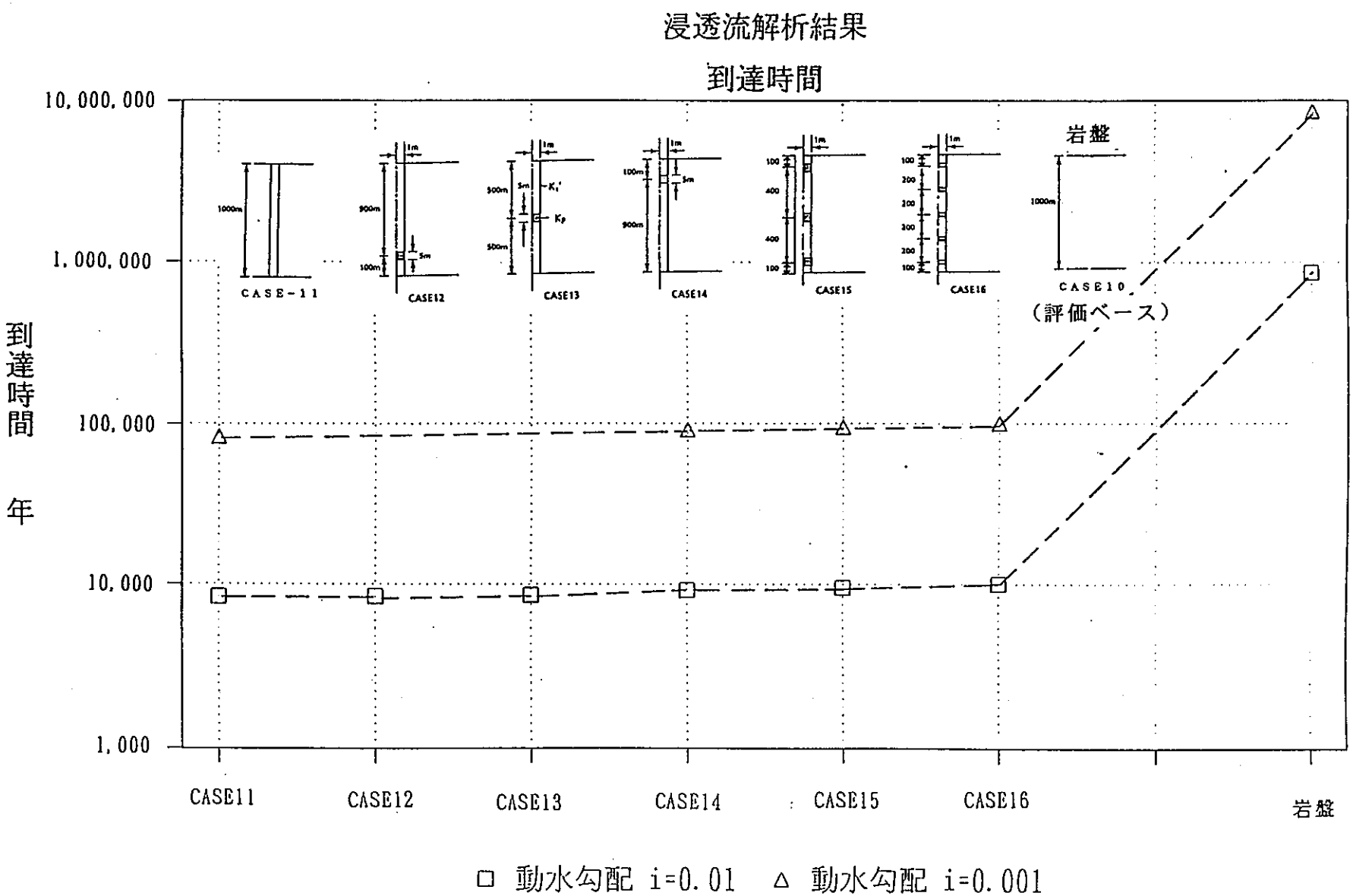

浸透流解析結果
到達時間
10,000,000
1,000,000
100,000
10,000
1,000
到達時間　年
CASE-11
CASE12
CASE13
CASE14
CASE15
CASE16
岩盤
CASE10
(評価ベース)
CASE11
CASE12
CASE13
CASE14
CASE15
CASE16
岩盤
□ 動水勾配 i=0.01　△ 動水勾配 i=0.001

図-3.6　浸透流解析結果

3.4 核種移行解析

3.4.1 解析モデル

(1) 解析モデル

解析モデルは浸透流解析と同様のモデルとする。

側方境界での濃度の出入りは無いものとする。

(2)解析物性値

対象核種は Np-237（半減期は 2,140,000 年）とする。

解析物性値を表-3.3に示す。

表-3.3 解析物性値

	透水係数 (cm/s)	単位体積重量(t/m³)	間隙率	分配係数 (m³/kg)	拡散係数 (m²/sec)
岩盤（健全部）	10^{-6}	2.7	0.01	0.001	5×10^{-10}
岩盤（ゆるみ域部）	10^{-4}	2.7	0.05	0.001	5×10^{-10}
岩盤（グラウト部）	10^{-5}	2.7	0.05	0.001	5×10^{-10}
プラグ	10^{-9}	2.0	0.4	0.16	5×10^{-11}
埋戻し材	10^{-7}	2.0	0.3	0.16	5×10^{-11}

3.4.2 解析手法

解析は有限要素法による３次元熱・水理・核種移行解析ｺｰﾄﾞFEMCOUP/MIGRATIONを用いて実施した。

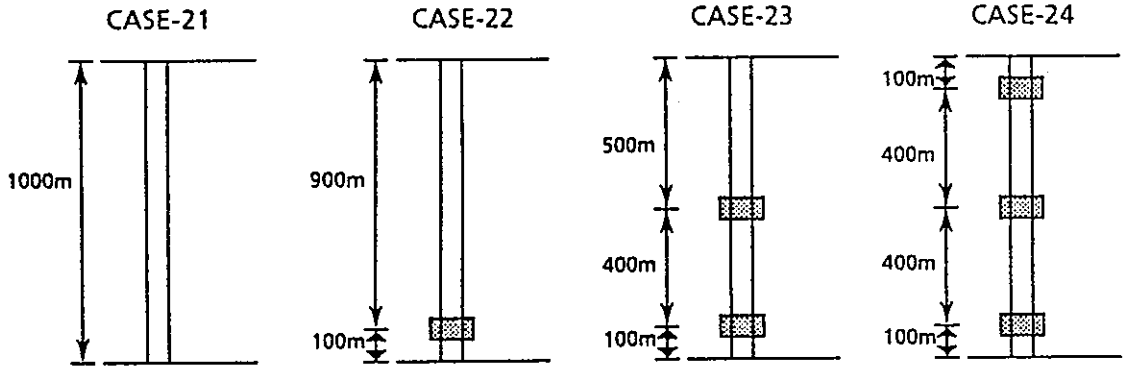
3.4.3 解析ケース

表-3.4に解析ケースを示す。

図－3.7にCASE-21～CASE-24のモデル図を示す。

表-3.4　解析ケース

	解析方法	プラグ個数	動水勾配	参照図
CASE-20	3次元(軸対称)	岩盤のみ	0.01	図-3.7
CASE-21	3次元(軸対称)	0	0.01	
CASE-22	3次元(軸対称)	1	0.01	
CASE-23	3次元(軸対称)	2	0.01	
CASE-24	3次元(軸対称)	3	0.01	
CASE-34	3次元(軸対称)	3	0.001	
CASE-44	2次元	3	0.01	
CASE-54	2次元	3	0.001	



図－3.7　CASE-21～CASE-24のモデル図

3.4.4 解析結果

解析は７ケース行っているが解析結果の差異を明確にするため、表-3.5に示す比較内容に従って解析結果を示す。

表-3.5　解析結果の比較内容

	比較する解析ケース	比較する解析内容
①	CASE-21とCASE-24	プラグを設ける場合とプラグを設けない場合を比較し、プラグの効果を確認する。
②	CASE-21とCASE-20	岩盤のみの場合（元の岩盤）と埋戻し材、岩盤、ゆるみ域にした場合を比較する。
③	CASE-24とCASE-34	動水勾配がi=0.01の場と動水勾配がi=0.001の場合の比較（プラグが３個の場合で比較）
④	CASE-24とCASE-44	３次元（軸対称）モデルと２次元モデルの比較（プラグが３個の場合で比較）

(1) CASE-21とCASE-24の比較

図-3.8に解析結果を示す。

プラグがある場合と無い場合を比較したものであるが、殆ど差異はない。この結果からプラグの効果はほとんどないことがわかる。これは以下の理由によるものと考えられる。

・プラグ長が短いため浸透流はプラグの周囲を回り込み、その効果がない。

・本検討では動水勾配がi=0.01であり、移流の効果が大きいと考えられる。従ってプラグの幅が５ｍほどでは効果はない。

(2) CASE-21とCASE-20の比較

図-3.9に解析結果を示す。

岩盤のみの場合（元の地盤）と埋戻し材、岩盤、ゆるみ域にした場合を比較したものであるが、あきらかに両者に差異がある。岩盤を掘削して埋戻した場合、地下水はその周辺のゆるみ域を通過する。本検討で用いているゆるみ域の透水係数と元の岩盤のものを比べると２オーダーゆるみ域の方が大きい。従って岩盤のみを考慮した場合の方が核種の上方への広がり方は遅く、側方への広がりが顕著である。

(3) CASE-24とCASE-34の比較

図-3.10に解析結果を示す。

プラグ３個の場合で動水勾配がi=0.01とi=0.001の場合を比較したものである。動水勾配がi=0.01の場合の方がi=0.001の場合より上方へ到達するのが早い。これは明らかにi=0.01の場合の方が地下水の流速が大きいからである。逆にi=0.001の場合は上方へ広がるのが遅い分だけ、岩盤の深部で核種が溜まっている様子が確認できる。

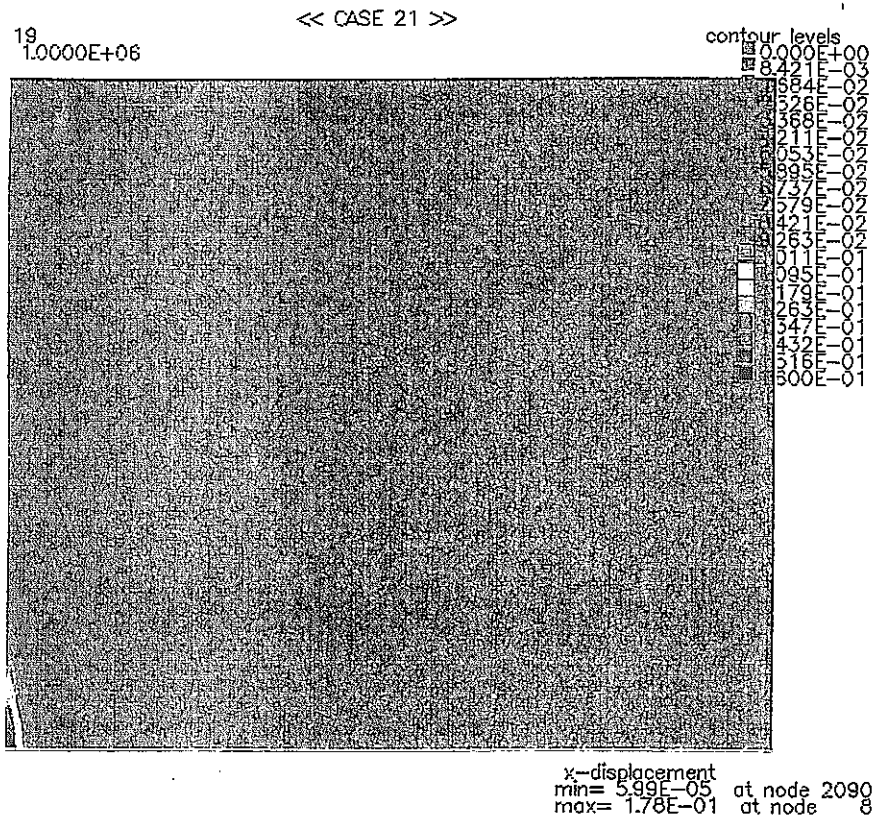
(4) CASE-24とCASE-44の比較

図-3.11に解析結果を示す。

プラグ３個の場合で３次元モデルと２次元モデルを比較したものである。両者の濃度のスケールが違うので単純に比較することはできないが、３次元モデルと２次元モデルで濃度の分布が異なる様子がわかる。２次元モデルは核種の濃度の上方への広がりが早く側方へは広がっていない。一方、３次元モデルは核種の上方への広がりが遅い。

このことから、解析モデルの違い（３次元、２次元）により解析結果に影響を与えることが確認できる。

ＣＡＳＥ２１（プラグ無し）	ＣＡＳＥ２４（プラグ３個）



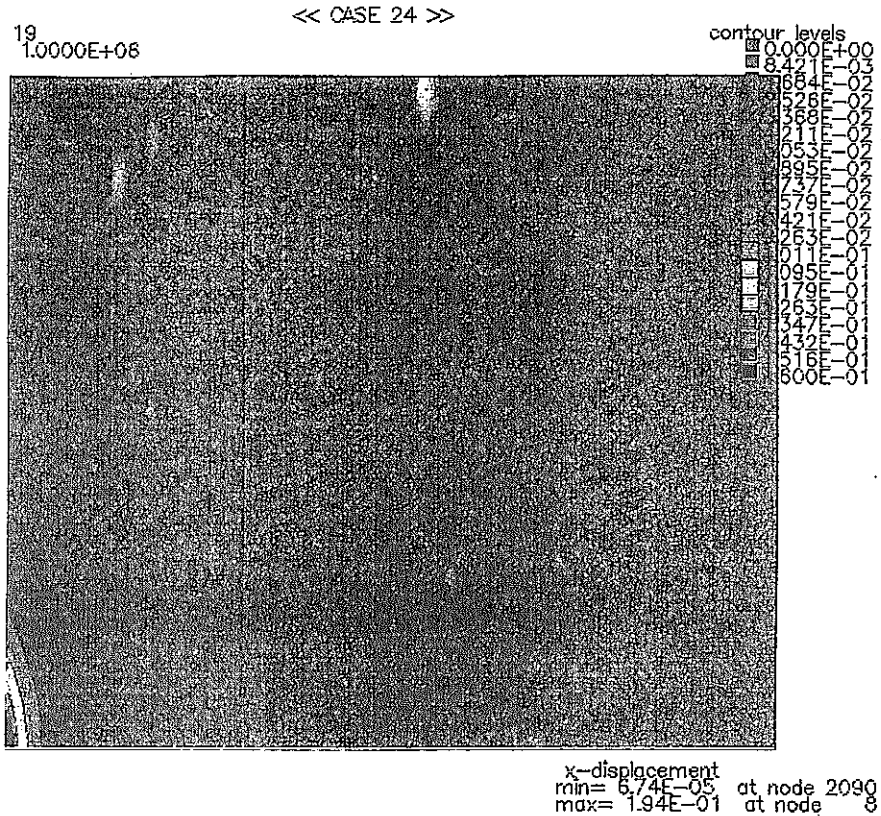
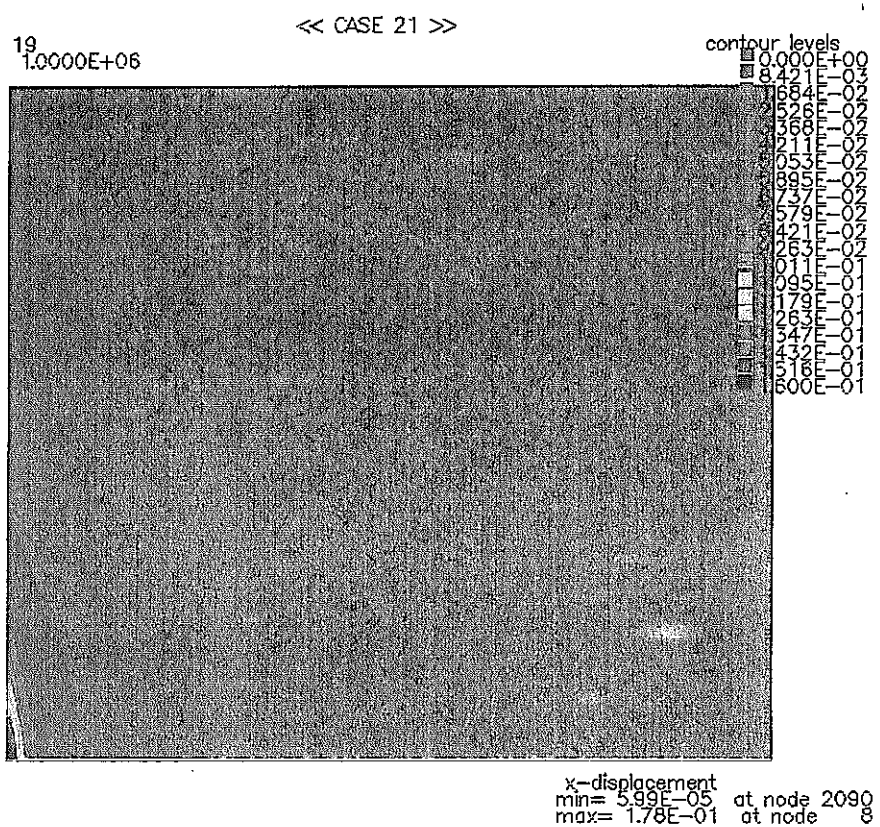


図-3.8　ＣＡＳＥ２１とＣＡＳＥ２４の核種移行解析結果（１００万年後）

ＣＡＳＥ２１（プラグ無し）	ＣＡＳＥ２０（岩盤のみ）



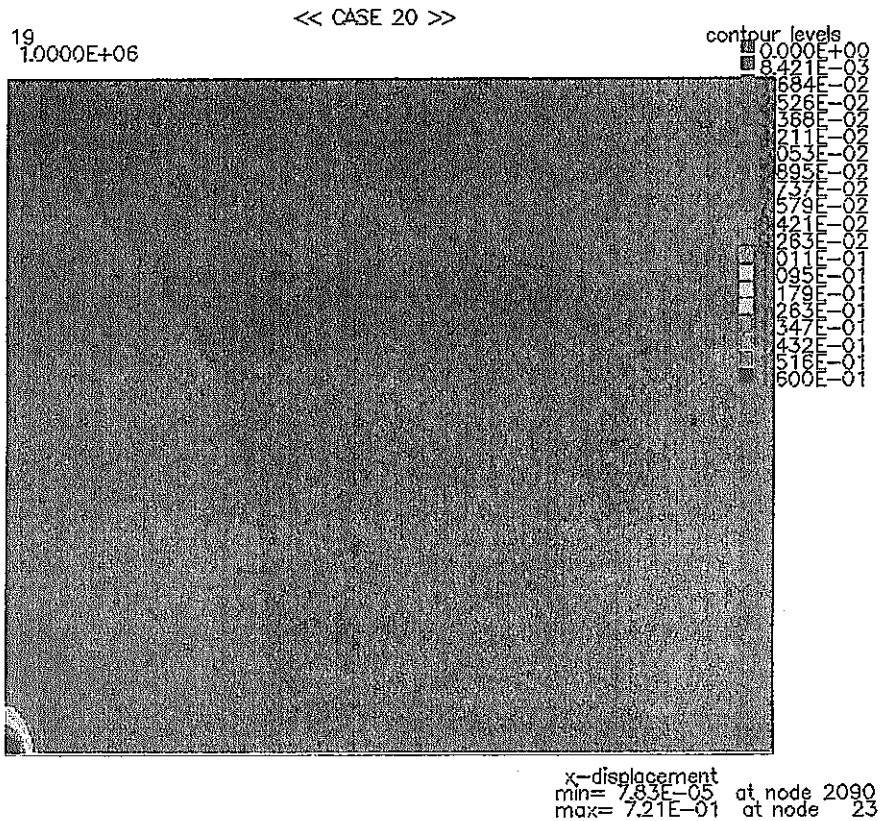


図-3.9　ＣＡＳＥ２１とＣＡＳＥ２０の核種移行解析結果（１００万年後）

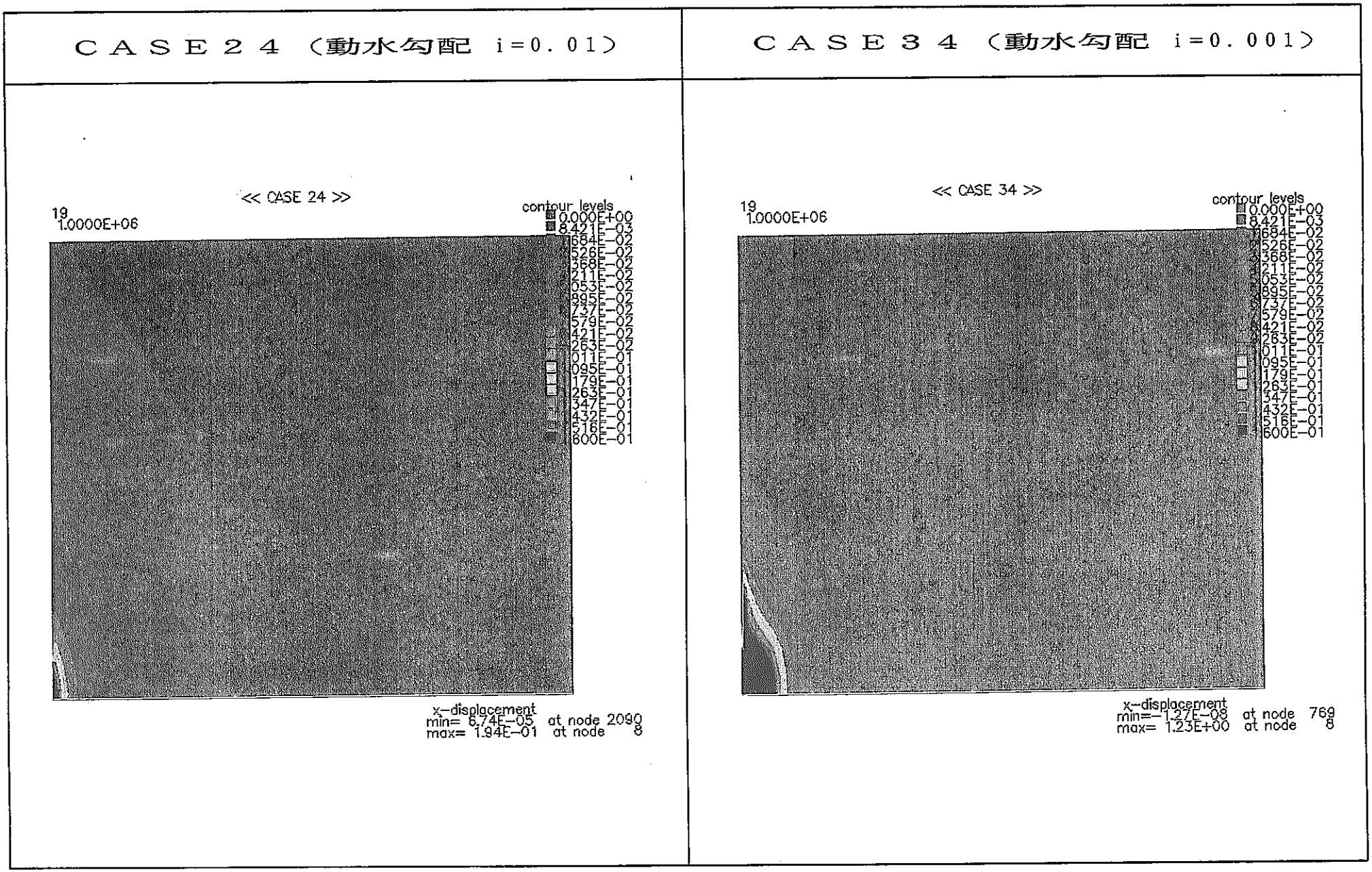
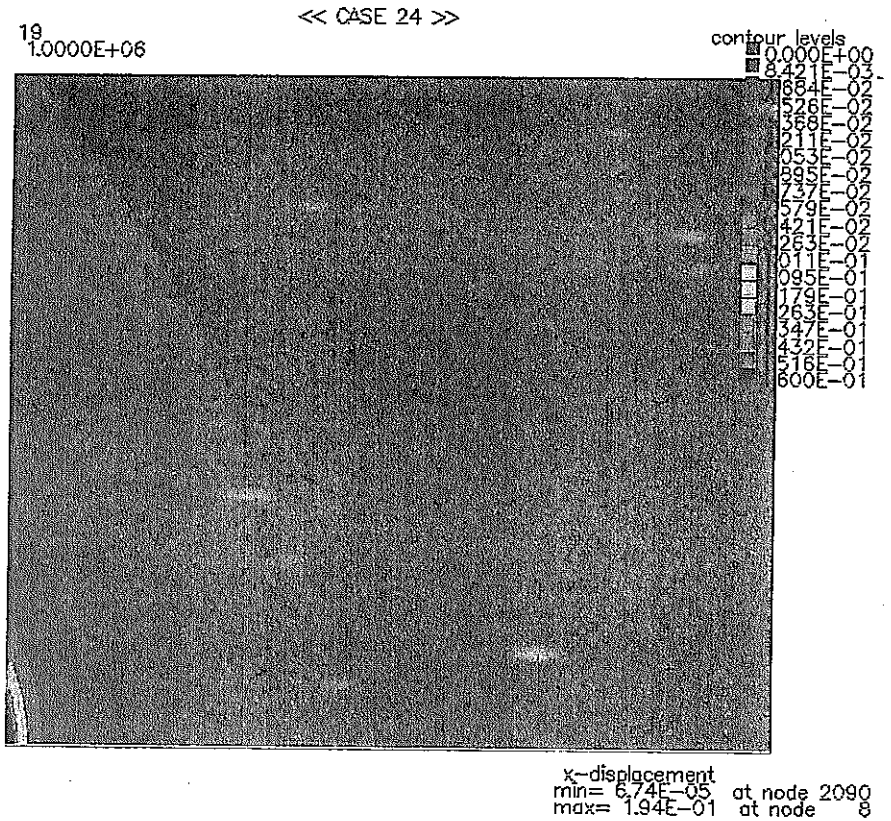


図-3.10　ＣＡＳＥ２４とＣＡＳＥ３４の核種移行解析結果（１００万年後）

ＣＡＳＥ２４（３次元モデル）	ＣＡＳＥ４４（２次元モデル）



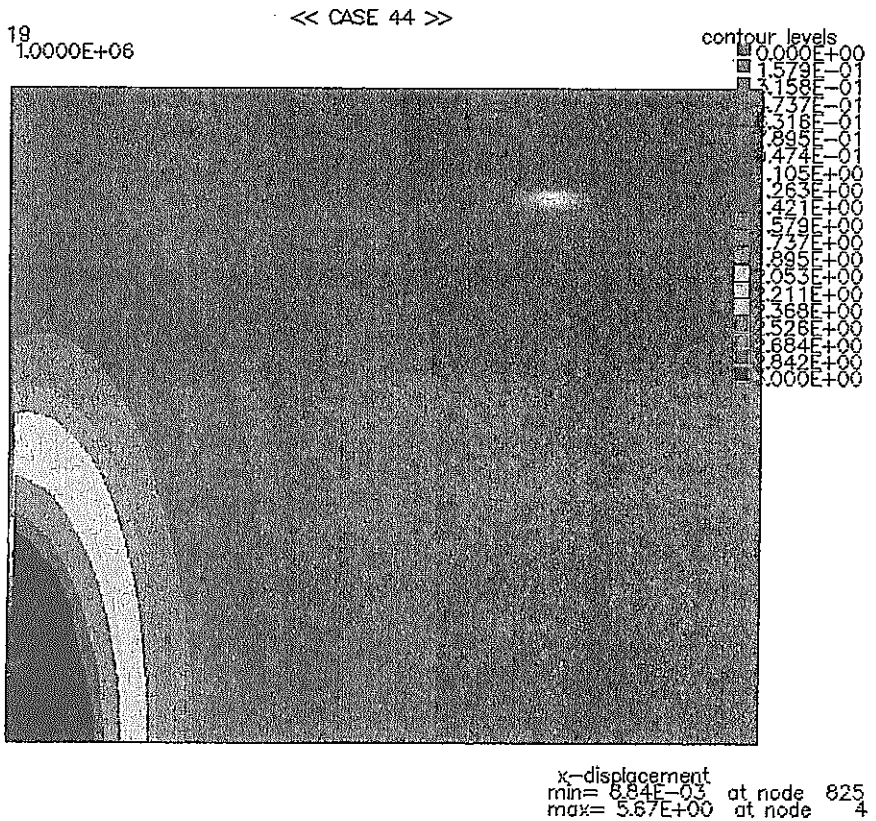


図-3.11　ＣＡＳＥ２４とＣＡＳＥ４４の核種移行解析結果（１００万年後）

3.5 まとめ及び今後の課題

3.5.1 まとめ

立坑部の地下水挙動は、掘削時における周辺岩盤のゆるみ発生状況に大きく支配されるため、解析で得られた知見をゆるみの発生状況と地下水挙動の関係から整理し、その要点をシーリング概念に反映することとする。

立坑部埋戻しの材料としては、これまでの研究成果より10～20%のベントナイトと掘削土砂を利用することにより、周辺岩盤部より透水性を小さくすることが十分可能と考えられる。

ただし、施工性の良否によっては目標性能を確保できないため、特に周辺岩盤と埋戻し材の隙間の施工に重点を置いた施工方法の確立が求められる。

立坑周辺岩盤に掘削によるゆるみが発生する場合、ほとんどの地下水流はゆるみ域を通過することになり、核種漏洩点から地上までの到着時間はゆるみ域の透水性とプラグ・グラフトによるゆるみ域の改善効果で決定され以下のように整理できる。

なお、今回の解析条件では動水勾配が大きく、核種移行解析において岩盤の吸着等の影響は現れなかった。

① プラグ設置時、プラグ周辺岩盤部にゆるみが発生するとプラグを設置してもプラグの効果は著しく軽減される。

② プラグと周辺岩盤の間にゆるみ域を発生させない場合又はゆるみが発生してもグラウトで透水性を周辺岩盤と同様まで改善する場合を考える。

今回の解析条件では核種漏洩点から地上までの到達時間の目標を健全岩盤を想定した場合の1/10程度とするとプラグの必要総延長は掘削深さの約1/10すなわち、今回の場合100mとなり５mのプラグを20個設置することが求められる。

なお、グラウトでゆるみ域の透水性を改善することについては、現状土木技術では 10^{-6}cm/sec程度が限界と考えられ、さらに低い透水性を求めるにはこの分野の技術開発が必要になる。

また、埋戻し部に周辺岩盤部より極端に小さい透水性を与えても地下水流は周辺岩盤を通過することから核種移行時間を大きくする効果はほとんどないと言える。

今回の解析で得られた上記知見からシーリング概念を構築するに当たり留意する点を以下に列挙する。

① 立坑掘削時にゆるみを生じさせないことがシーリングの品質を確保する上で特に重要である。

② 立坑埋戻し部には周辺健全岩盤部よりやや低い（１～２オーダー）難透水性を与えるのが合理的であり、極端に低い難透水性を与えても効果は増大しない。

③ プラグを設置する場合、周辺岩盤にゆるみを生じさせるとプラグの効果はほとんどなくなるため、プラグ設置のための掘削方法の改善（例えばウォータージェット）により周辺岩盤をゆるめないことが特に重要と言える。

④ プラグ自体の難透水性については地下水流動の観点からは極端な難透水性にする必要はなく周辺健全岩盤部より２～３オーダー低い難透水性を与えるのが合理的と考えられる。

3.5.2 今後の課題

以上の検討結果をふまえ今後の検討課題を以下に列挙する。

○地質環境条件の評価（周辺岩盤の透水特性、動水勾配……）

○化学環境条件の評価

○処分坑道を対象とした解析的検討

○地質状況（特に断層等）への対応（解析的検討）

○シーリングコンセプトの見直し・構築

○埋戻し材料（礫混りベントナイト混合土）の物性評価

○埋戻し（特に周辺岩盤と埋戻し材の隙間）の施工法の確立

参考文献

1) 大成建設(株)、(株)大林組、鹿島建設(株)、清水建設(株)、(株)間組；地層処分システムの設計研究(Ⅱ) PHC PJ1449-91-001、資料D1-67～77「熱地下水解析」

2) 動力炉・核燃料開発事業団；処分場立坑のシーリングシステムに関する検討
－立坑周辺の地下水、核種移行解析－ PHC ZN8410-92-332

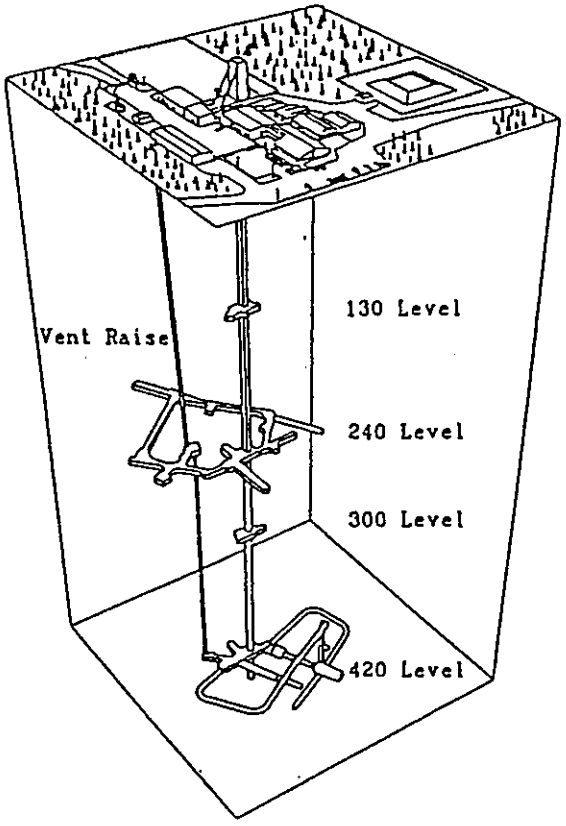
4．原位置試験設計

4.1　試験サイトの概要

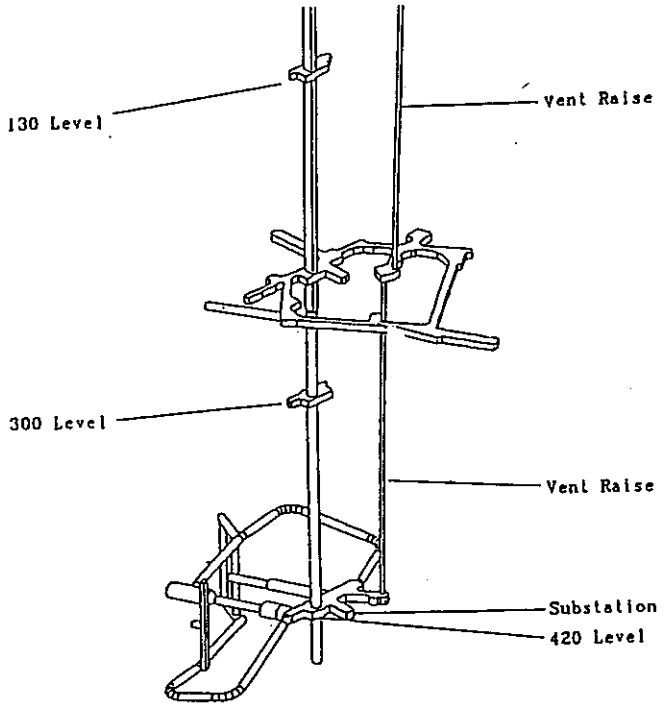
4.1.1　試験サイトの位置

カナダのＵＲＬ（地下研究施設）は、カナダ核燃料廃棄物管理計画（Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program；ＣＮＦＷＭＰ）に従ってカナダ原子力公社（Atomic Energy of Canada Limited；ＡＥＣＬ）が運営しており、場所はマニトバ州ウイニペグの北東120kmで、地下施設は図－4.1、4.2に示すように立坑といくつかのレベルでの横坑からなっている。サイトの面積は3.8km²で、21年間にわたってマニトバ州から借用している。

ＵＲＬでは、これまで主として地質構造、地下水流動、地球化学等の調査研究および核種移行試験を進めてきたが、今後シーリング性能に関する試験を本格的に進める段階にあり、これまで緩衝材、グラウト材等の室内試験とそれに基づく人工バリア試験、グラウト性能試験が開始されており、今後それらの成果を集約したシャフトシーリング性能試験、マルチコンポーネント試験を進めようとしている。



図－4.1　ＵＲＬの構造

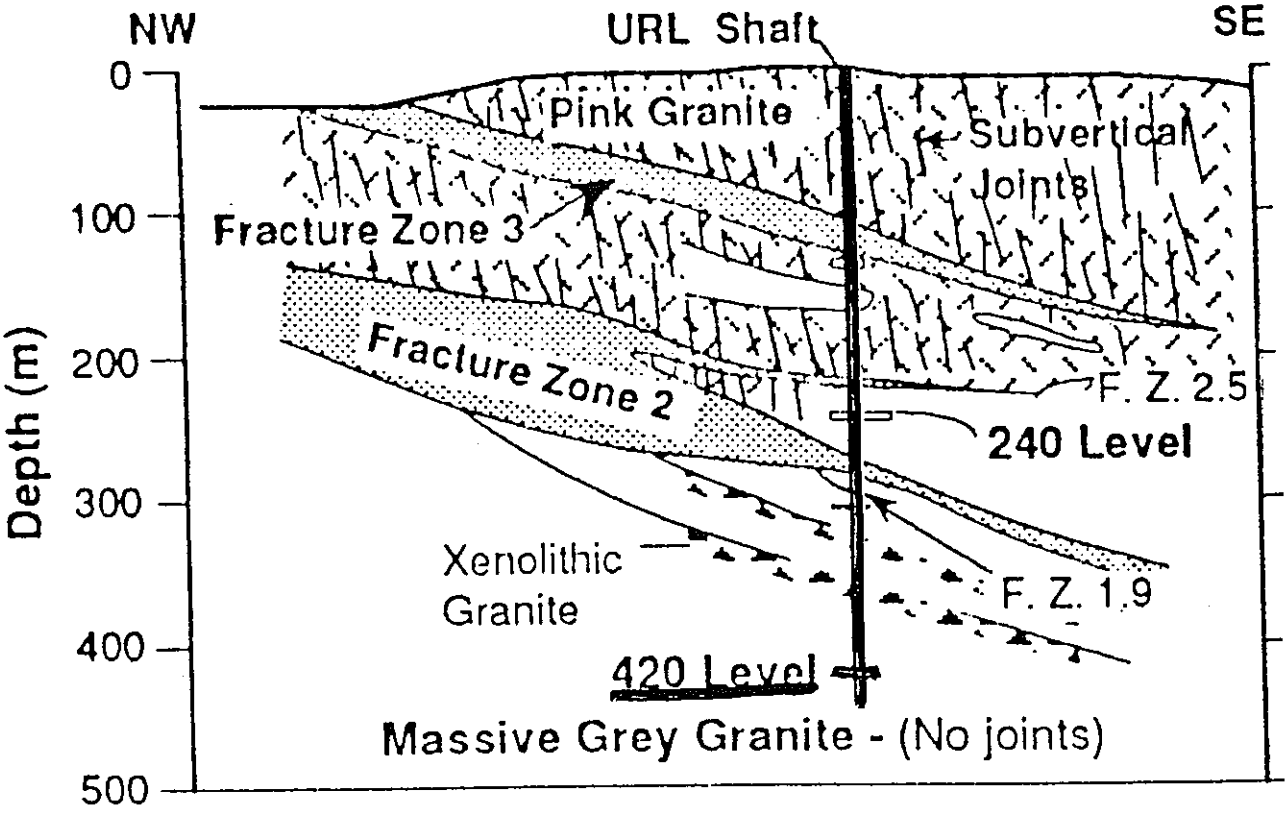


図－4.2　ＵＲＬの構造（240mレベルと420mレベル）

4.1.2　試験サイトの地質

ＵＲＬ付近では、マニトバ南東部に広がるLAC Du BONNETバソリス（花崗岩貫入岩体、26億年以上の古さ。）が広く分布している。ＵＲＬサイトの直下では、北西方向の地表から南東方向の深部に向かって緩傾斜の３つの主なフラクチャーゾーン（ＦＺ）が存在し、ＵＲＬを横切るものとしてはＦＺ－２，３がある（図－4.3参照）。サイト周辺の広域の地質構造を調べるために、レーダー探査、地表調査、物理探査等が行われている。

広域地下水流動を規制する地質的要因としては、リモートセンシングによって検出されているリニアメントが考えられ、これらの断層は透水特性の異なる岩盤の境界であり、地下水流動に影響している。本施設のサイトは、片麻岩と花崗岩の境界や断層の分布を考慮して選定されている。広域の地質構造、特に岩種の境界を調べるため空中ブーゲ重力異常マップを作成し、境界部は密な等高線として検出されている。さらに、重力モデルや磁場モデルの結果、花崗岩バソリスの形状が深さ約14kmまで明らかとなった。地下施設の建設に伴う地下水位の変化は、1984年以降連続的にモニタリングされている。



図－4.3　ＵＲＬ付近の地質概要

4.2 原位置試験方法の検討

4.2.1 原位置試験の背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおいては、処分場建設のために掘削された空洞や周辺岩盤ゆるみ域は、埋戻し、プラグ、グラウト等の技術を用いて適切にシーリングすることにより、地層が本来有する天然バリア性能を損なうことのないよう処置される。

本試験は、シャフトシーリング性能試験を通じて空洞および周辺岩盤ゆるみ域のシーリングシステムの性能評価手法を開発検証するとともに、埋戻し、プラグ、グラウトの個々の要素技術の適用性評価を行うことを目的とする。

4.2.2 原位置試験での評価項目

原位置試験において評価すべき項目は、前述のように、

① 空洞掘削の影響
② プラグ材料の性能確認
③ 埋戻し材料の性能確認
④ グラウトの効果確認
⑤ 全体システムの性能確認

の５項目である。これらの項目ごとに原位置で実施する試験内容を表－4.1に示す。

表－4.1 シーリング試験における評価項目と原位置試験

評価項目	原位置試験
立坑の掘削影響評価	施工試験（発破掘削、機械掘削）
プラグ（圧縮ベントナイトブロック）の施工性および性能評価	施工試験、注水試験
埋戻し材（礫混りベントナイト）の施工性および性能評価	施工試験、注水試験
（粘土系グラウトの施工性および効果確認）	施工試験、注水試験
総合的なシーリング性能評価	注水試験（トレーサー使用）

4.3 原位置試験の概念（立坑シーリング試験）

4.3.1 試験の仕様

ＡＥＣＬの地下研究施設（ＵＲＬ）420mレベルの結晶質岩中に試験立坑を掘削し、掘削影響領域の調査を行った後、立坑および周辺掘削影響領域にシーリングを施工して、透水試験、トレーサー試験を行い、シーリングシステム性能を評価する。

本試験は、以下の手順で実施する。

- ○ シーリング材料特性評価試験
- ○ 試験立坑掘削前のサイト調査
- ○ 試験立坑掘削および掘削影響領域調査
- ○ シーリング施工試験
- ○ シーリング性能試験

シーリング性能試験の概念を図－4.4に示す。また、試験のフローを図－4.5に示す。

一方、試験規模をやや縮小し、短い立坑において実施する性能試験をオプションとして検討している。その場合の仕様を図－4.6に示す。なお、試験のコストや工程を考慮した場合、オプション・ケースの方が実現可能性が高いと考えられる。

4.3.2 試験方法

(1) シーリング材料特性評価試験

原位置試験に先立ち、シーリング材料である埋戻し材、プラグ材、グラウト材について、室内において材料試験を行い、材料配合および仕様、材料特性を事前に評価する。

評価項目としては、材料の力学特性（粒径分布、配合率、空隙率、締固め曲線、強度等）、水理特性（膨潤圧、透水係数、不飽和浸透特性等）、化学特性（トレーサー吸着特性、溶解、変質等）、核種移行特性等が挙げられる。

各シーリング要素の候補材料は、以下のとおりである。

① プラグ材料

プラグ材料としては、止水性、可塑性、自己シール性および還元環境維持性を考慮して、珪砂を含むベントナイトを使用する。

プラグの施工法としては、あらかじめ作成した圧縮ベントナイトブロックを敷き詰めて行く方法と、原位置にてベントナイト粉末をタンパー等で直接締固める方法の２種類に大別できる。ＰＮＣでは、両方式について緩衝材大型試験設備で既に作成施工した実績がある。なお、釜石原位置試験の人工バリア試験において、後者を実施する予定である。本試験においては、浸潤後のベントナイトプラグの止水性能を評価するため、プラグ位置からプラグ浸潤完了までに要する時間的制約を考慮し、隙間を設けて圧縮ベントナイトブロックを敷き詰めて行く方法を採用する。

② 埋戻し材料

埋戻し材料としては、止水性および周辺岩盤の長期的変形に対する追随性を考慮して、ベントナイトと原位置発生ズリの混合材料を採用する。

施工法としては、粒径調整済みの砕石をベントナイト中に均一混合した材料を原位置にて敷き均した後、タンパー等にて直接締固める方法を採用する。

③ グラウト材料

グラウト材料としては、長期耐久性および還元環境維持性を考慮して、ベントナイトを採用する。

本試験に用いるグラウトの仕様および施工法に関しては、釜石原位置試験のグラウト試験の成果を反映させるものとする。

(2) 試験立坑掘削前のサイト調査

シーリング性能試験を実施する原位置試験場の地質特性、岩盤力学特性、水理特性を把握するために、試験立坑掘削前に調査・計測を実施する。

調査項目は、トモグラフィー調査、透水試験、間隙水圧測定および試錐コアを用いた室内岩石試験などが挙げられる。

(3) 試験立坑掘削および掘削影響領域の調査

試験立坑は、上下の水平坑道を利用して掘削する。なお、試験立坑地点では、掘削および試験のための作業エリアとして、上下の水平坑道を拡幅することが考えられる。

立坑の掘削方法は、経済性および岩盤へ与える損傷度が大きい保守的な場合を考慮して、発破工法を採用する。

立坑の掘削後、掘削影響領域の分布およびその特性を調査・評価する。調査方法としては、立坑内に仮プラグを設置し、この上部に水を張って掘削影響領域の透水係数を測定する。また、孔間トモグラフィー調査を行い、掘削影響領域の分布、形状等を把握する。

立坑掘削と同時に、プラグ設置箇所において、立坑掘削による影響領域を除去するために、岩盤壁面をウォータージェット工法により切削する。ここでは、岩盤の切削技術の原位置適用性を評価する。さらに、ウォータージェット工法を用いた切削の効果を立坑掘削による影響領域との比較により評価する。

(4) シーリング施工試験

① 埋戻し

まず、下部仮プラグ上にベントナイトとズリ砕石の混合材料を設置して、埋戻し施工試験を行う。試験項目は、締固め度測定（密度、含水率およびその分布状況）および膨潤圧測定（土圧計）である。また、本試験を通じて、原位置での埋戻し材の施工技術を評価する。

② グラウト

次に、切削部岩盤内にベントナイトグラウトを施工し、グラウトの施工試験を行

う。掘削影響領域へのグラウト注入方法については、セメントグラウトと同様、切削壁面より試錐孔を穿孔し、加圧注入する方法を採用する。ただし、グラウト注入時には濃度・圧力の管理を行いながら、グラウト材の立坑内への漏洩（リーク）に対処するとともに、試錐孔が地下水移行経路となることを抑制するために、注入後孔内をベントナイトで閉塞する。

③　プラグ

最後に、切削箇所に圧縮ベントナイトブロックを設置し、プラグ施工試験を行う。試験項目は、材料の品質確認のための締固め度測定（密度、含水率およびその分布状況）、および膨潤圧測定（土圧計）である。ここでは、プラグの設置技術を評価する。

なお、ベントナイトプラグの膨潤を抑えるために仮プラグを設置する。この時、仮プラグを岩盤へ定着させるためのアンカー打設による、地下水流動に与える影響を緩和させるために、プラグ上に埋戻し材を設置して、ベントナイトプラグから離す必要がある。

なお、試験終了時においても、材料の品質確認のために、プラグおよび埋戻し材の締固め度測定（密度、含水率およびその分布状況）を実施する。

(5)　シーリング性能試験

性能試験にあたっては、シーリングの組合わせの効果を評価するために、以下に示すように段階を追って試験を行う。

①　第１フェーズ試験（埋戻し単体）

まず最初に、埋戻し材の透水性評価および岩盤と埋戻しとの接合面の水理挙動の評価を行なうための性能試験を行う。

仮プラグ上に埋戻し材を施工して浸潤完了後、透水試験を行なう。試験方法としては、埋戻し材上部に上側水平坑道レベル程度まで水を張り、埋戻し本体、岩盤部および岩盤と埋戻しとの接合面を浸透する水量を、坑道の一定区間ごとに集水して測定する。

②　第２フェーズ試験（埋戻しおよびグラウト）

次に、プラグ設置部付近に施工した粘土グラウト注入による岩盤の透水性改良効果を評価するために、透水試験を行なう。

試験は第１フェーズ試験と同様、埋戻し材上部に上側水平坑道レベル程度まで水を張り、埋戻し本体、改良された岩盤部および岩盤と埋戻しとの接合面を浸透する水量を測定する。

③　第３フェーズ試験（シーリングシステム）

最終段階の試験として、プラグ、グラウトおよび埋戻しのシステム全体としてのシーリング性能評価を行なう。埋戻し上部にベントナイトプラグ材を設置し、ベントナイトが自己シール性を発揮するまで浸潤させた後、NaClを用いたトレーサー試

験を行い、シーリングシステムとしての性能を評価する。試験は、プラグ上部に上側水平坑道レベル程度まで水を張り、これにNaClトレーサーを投入して、プラグ本体、埋戻し、改良された岩盤部および岩盤とプラグとの接合面、岩盤と埋戻しとの接合面を浸透する水量およびトレーサー濃度を測定する。また、岩盤内トレーサーの移流・拡散特性を評価するために、岩盤内に設置した計器（間隙水圧計、pH計）を用いて、トレーサー濃度および間隙水圧を測定する。

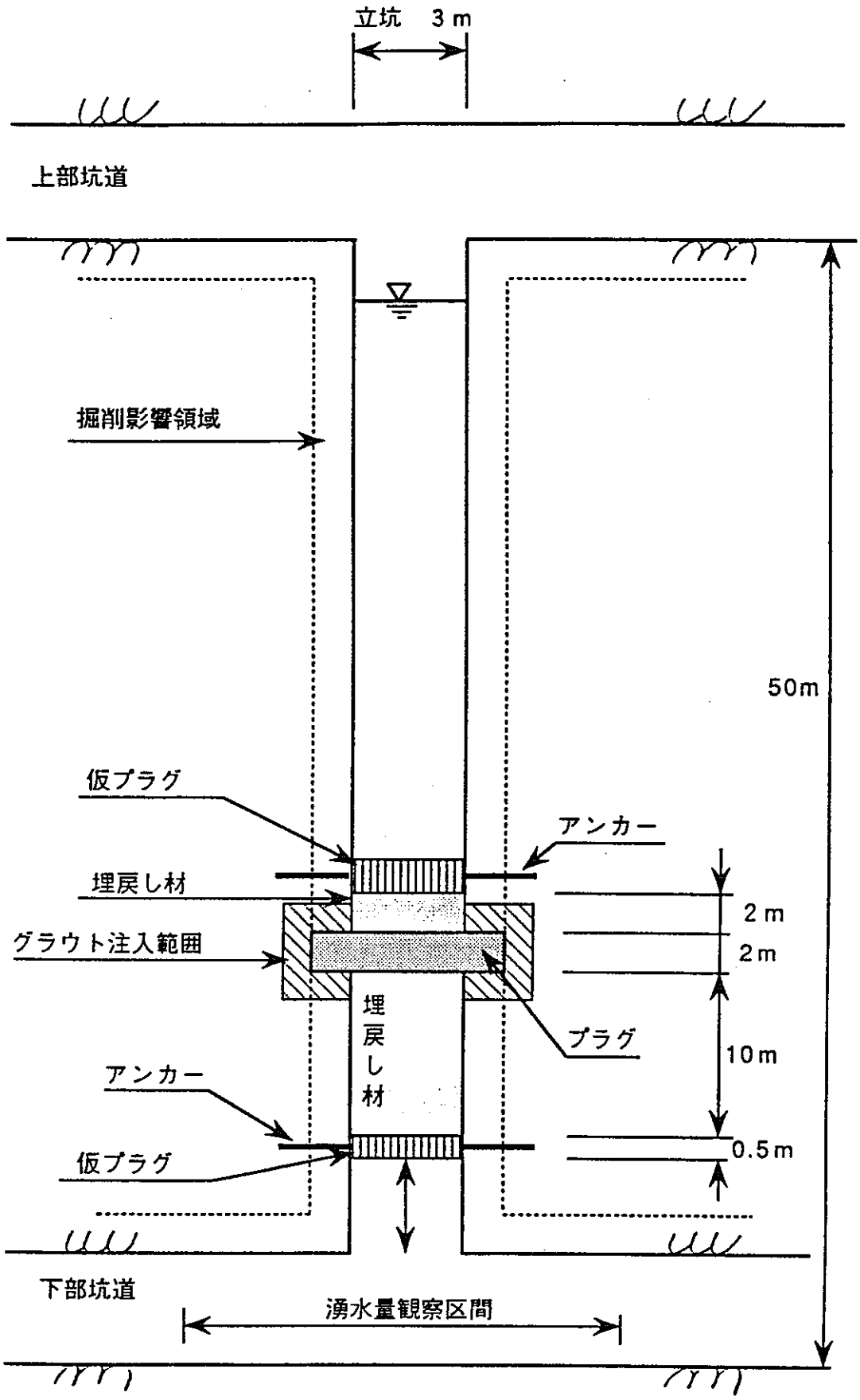
トレーサー試験終了後、埋戻し材、プラグ材およびグラウト改良岩盤をサンプリングし、シーリング材と岩盤の接合状況およびグラウト改良範囲等の確認を行なう。

(6) シーリングシステム性能評価モデルの開発・検証

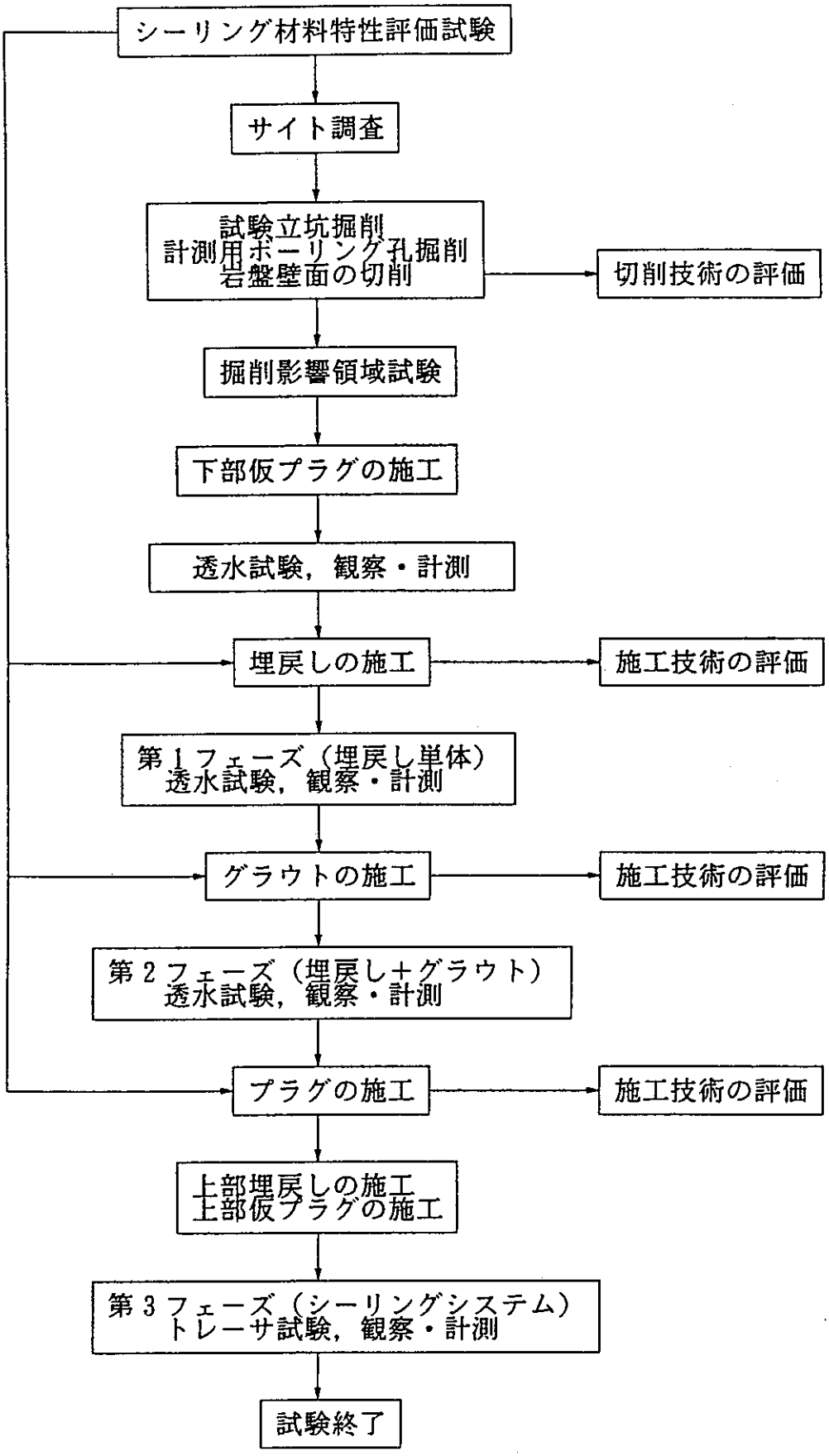
シャフトシーリング性能試験の結果を基に、シーリングシステム性能評価モデルの開発・検証を行なう。具体的には解析評価を行ない、原位置試験結果と対比することが考えられる。

4.3.3 試験手順と工程

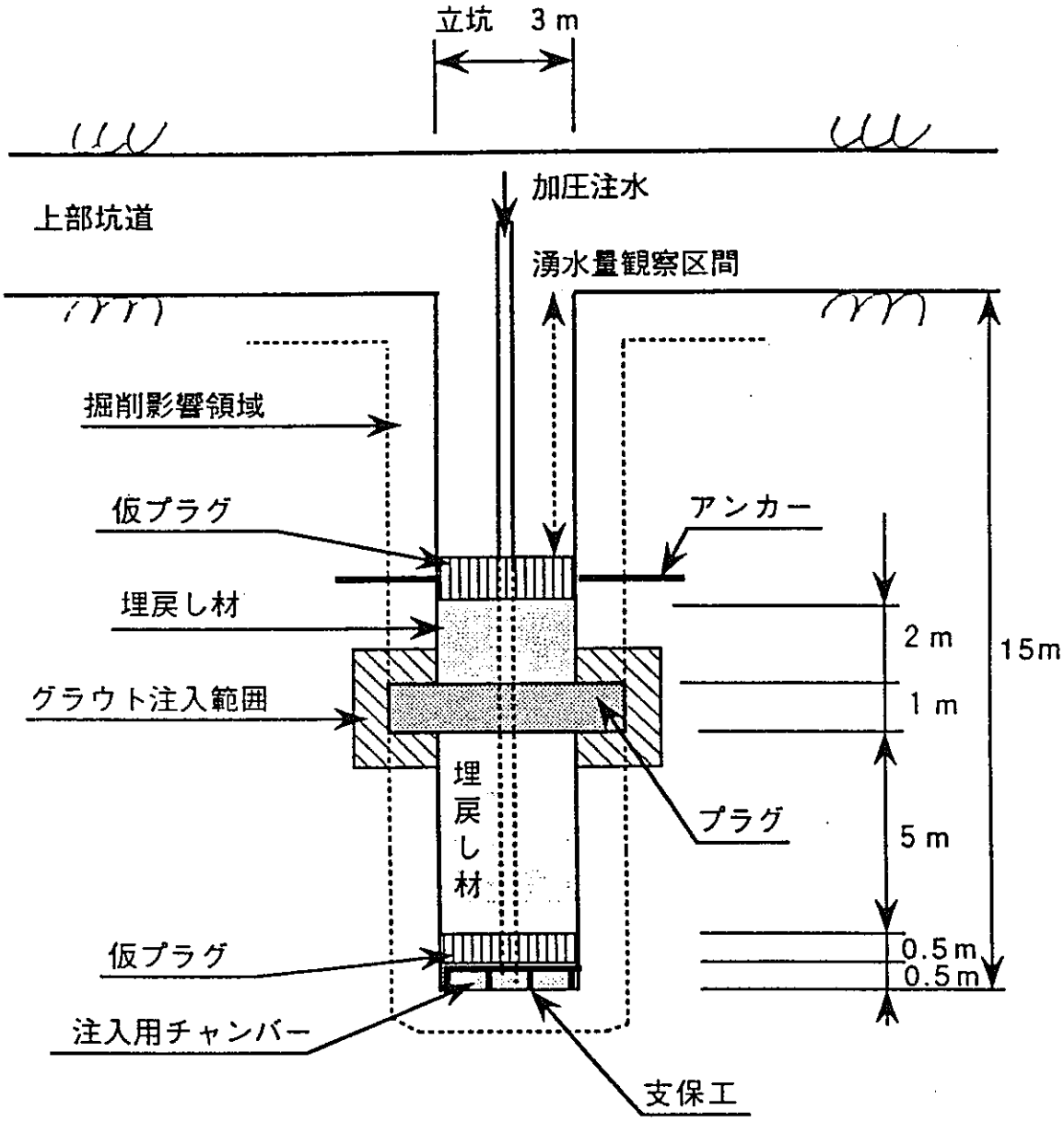
前項で示した施工内容や原位置試験に基づいて、全体の施工手順並びに試験手順・工程を検討した結果が図－4.7～4.10である。このうち、図－4.7～4.8が実現性が高いと考えられた深さ20m立坑を掘り込むオプション・ケースであり、図－4.9～4.10は立坑を下部の連絡トンネルまで貫通させて長さ50m区間で試験を行うケースである。なお、図－4.7及び4.9の施工手順については、各施工段階ごとの留意点を●印、今後の課題を○印で図中に表わした。



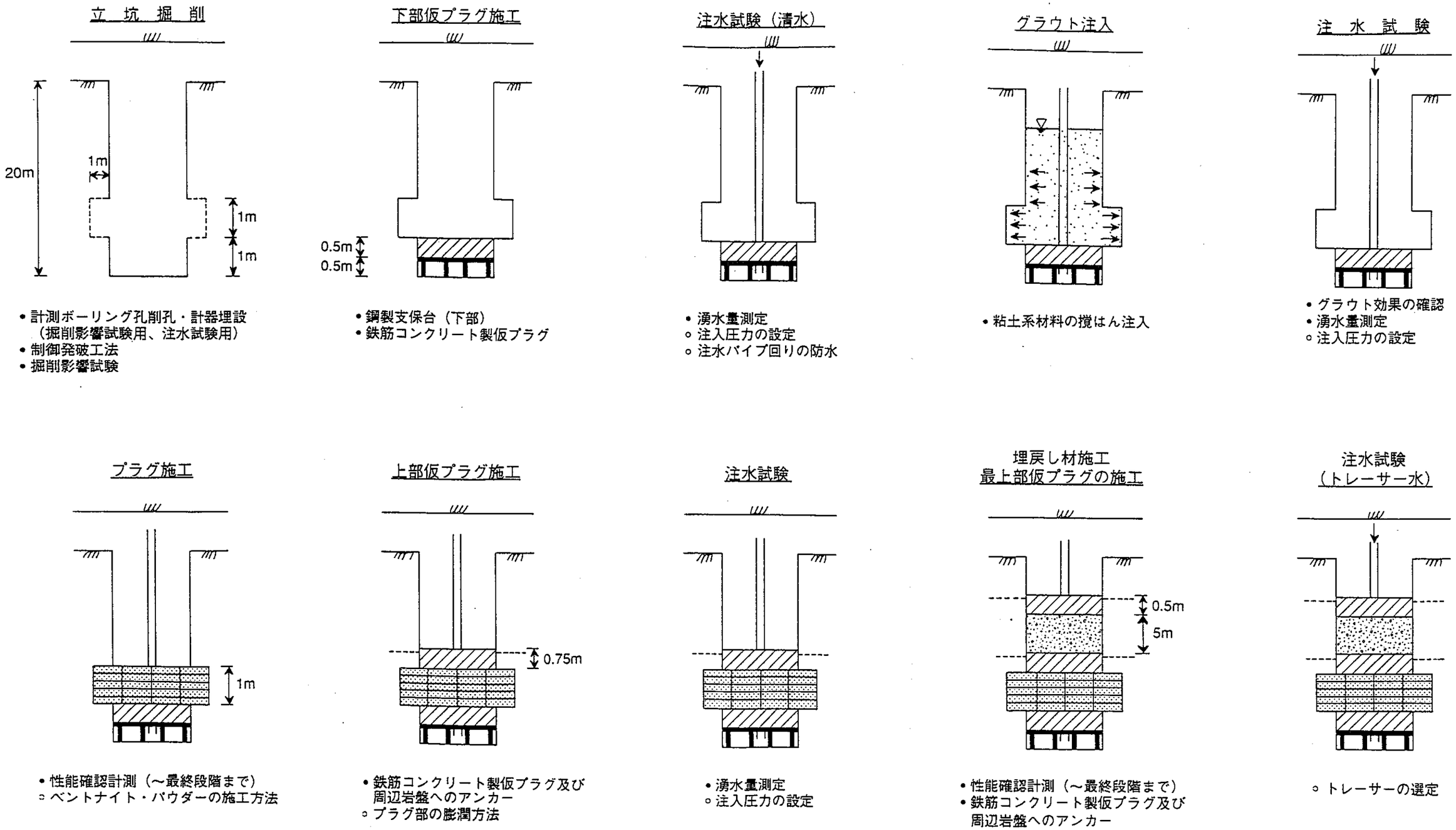
図－4.4　シーリング性能試験の概念



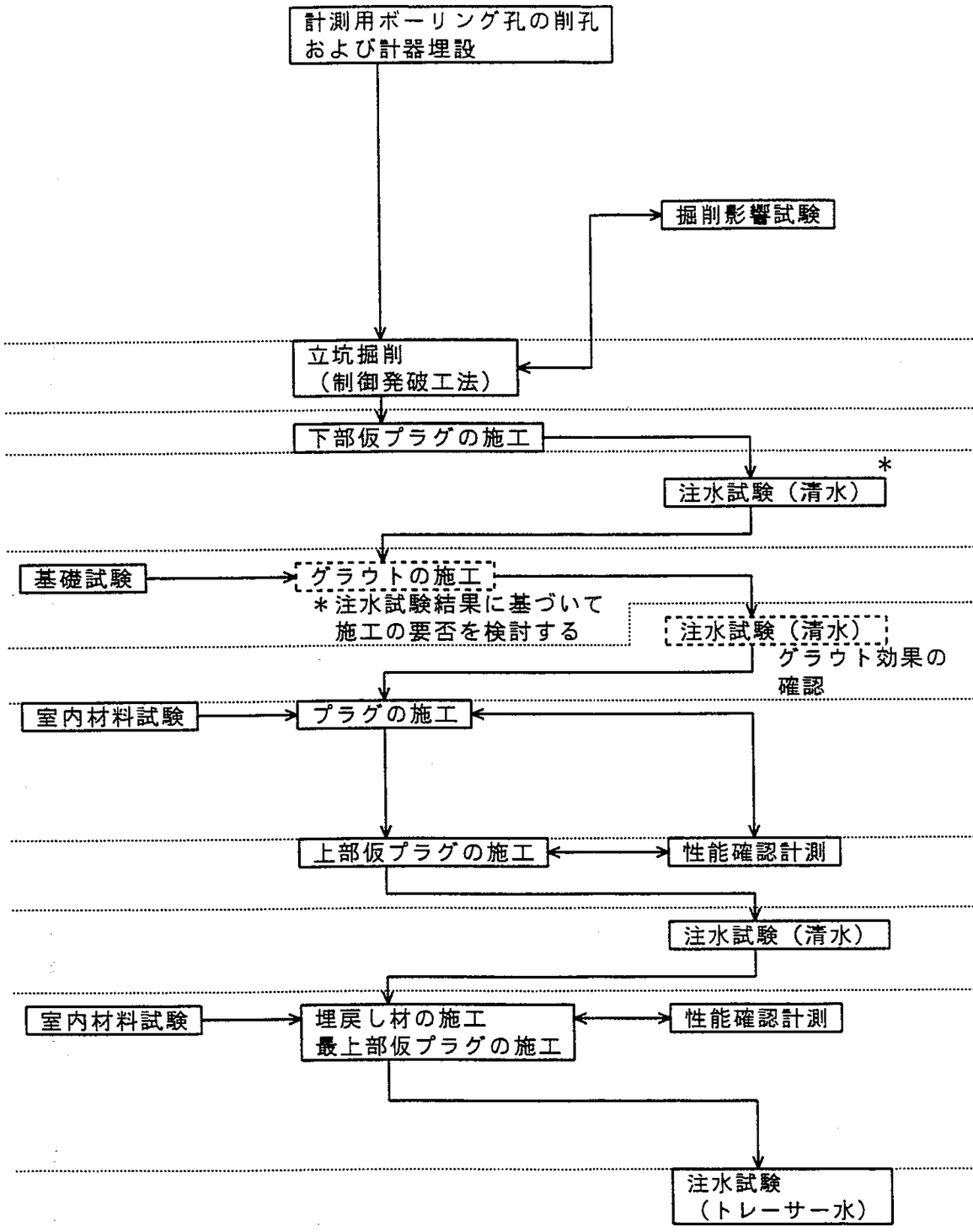
図－4.5　シーリング試験のフロー



図－4.6　計測用ボーリング孔のレイアウト（オプション）

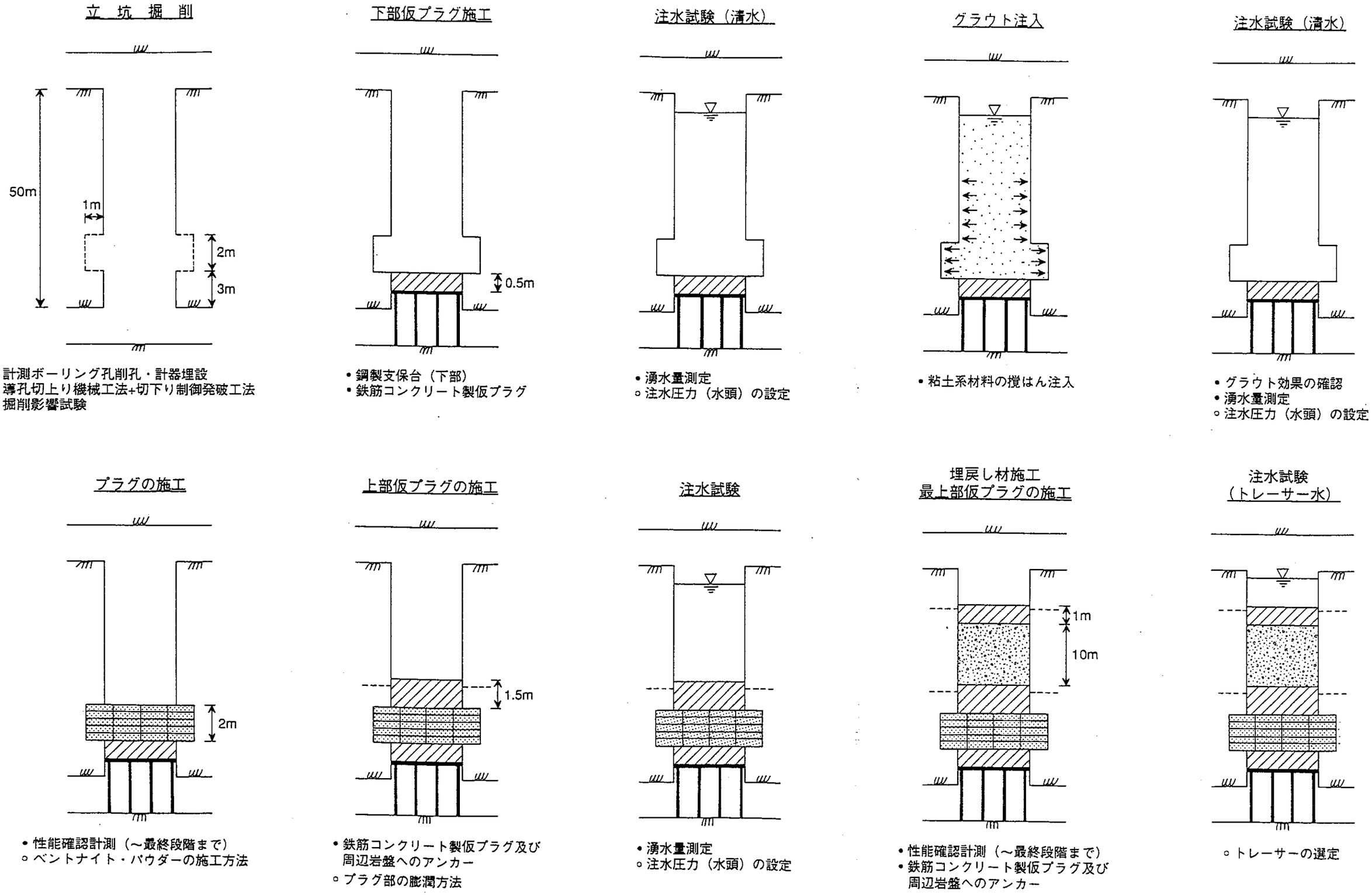


図－4.7　施工手順（オプション）

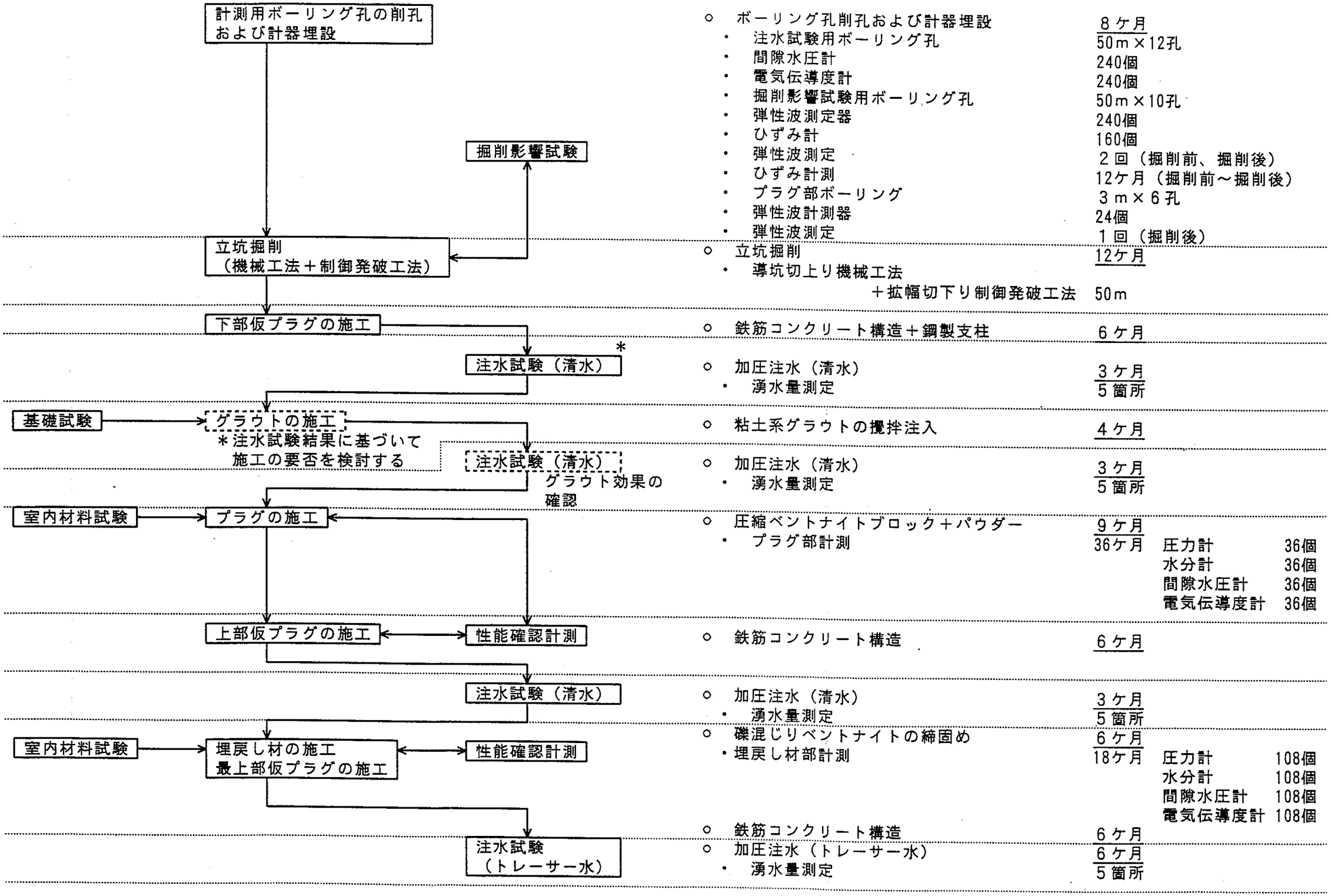


○ ボーリング孔削孔および計器埋設	4ケ月		
・ 注水試験用ボーリング孔	20m×12孔		
・ 間隙水圧計	120個		
・ 電気伝導度計	120個		
・ 掘削影響試験用ボーリング孔	20m×10孔		
・ 弾性波測定器	120個		
・ ひずみ計	80個		
・ 弾性波測定	2回（掘削前、掘削後）		
・ ひずみ計測	8ケ月（掘削前～掘削後）		
・ プラグ部ボーリング	3m×6孔		
・ 弾性波計測器	24個		
・ 弾性波測定	1回（掘削後）		
○ 立坑掘削	8ケ月		
・ 制御発破工法	20m		
○ 鉄筋コンクリート構造＋鋼製支柱	3ケ月		
○ 加圧注水（清水）	3ケ月		
・ 湧水量測定	5箇所		
○ 粘土系グラウトの攪拌注入	3ケ月		
○ 加圧注水（清水）	3ケ月		
・ 湧水量測定	5箇所		
○ 圧縮ベントナイトブロック＋パウダー	6ケ月		
・ プラグ部計測	24ケ月	圧力計	18個
		水分計	18個
		間隙水圧計	18個
		電気伝導度計	18個
○ 鉄筋コンクリート構造	3ケ月		
○ 加圧注水（清水）	3ケ月		
・ 湧水量測定	5箇所		
○ 礫混じりベントナイトの締固め	3ケ月		
・埋戻し材部計測	12ケ月	圧力計	54個
		水分計	54個
		間隙水圧計	54個
		電気伝導度計	54個
○ 鉄筋コンクリート構造	3ケ月		
○ 加圧注水（トレーサー水）	6ケ月		
・ 湧水量測定	3箇所		
	計 48ケ月		

図－4.8　試験手順及び工程（オプション）


立　坑　掘　削
50m
1m
2m
3m
• 計測ボーリング孔削孔・計器埋設
• 導孔切上り機械工法+切下り制御発破工法
• 掘削影響試験
下部仮プラグ施工
0.5m
• 鋼製支保台（下部）
• 鉄筋コンクリート製仮プラグ
注水試験（清水）
• 湧水量測定
◦ 注水圧力（水頭）の設定
グラウト注入
• 粘土系材料の撹はん注入
注水試験（清水）
• グラウト効果の確認
• 湧水量測定
◦ 注水圧力（水頭）の設定
プラグの施工
2m
• 性能確認計測（～最終段階まで）
◦ ベントナイト・パウダーの施工方法
上部仮プラグの施工
1.5m
• 鉄筋コンクリート製仮プラグ及び
周辺岩盤へのアンカー
◦ プラグ部の膨潤方法
注水試験
• 湧水量測定
◦ 注水圧力（水頭）の設定
埋戻し材施工
最上部仮プラグの施工
1m
10m
• 性能確認計測（～最終段階まで）
• 鉄筋コンクリート製仮プラグ及び
周辺岩盤へのアンカー
注水試験
（トレーサー水）
◦ トレーサーの選定

図－4.9　施工手順



図－4.10 試験手順及び工程

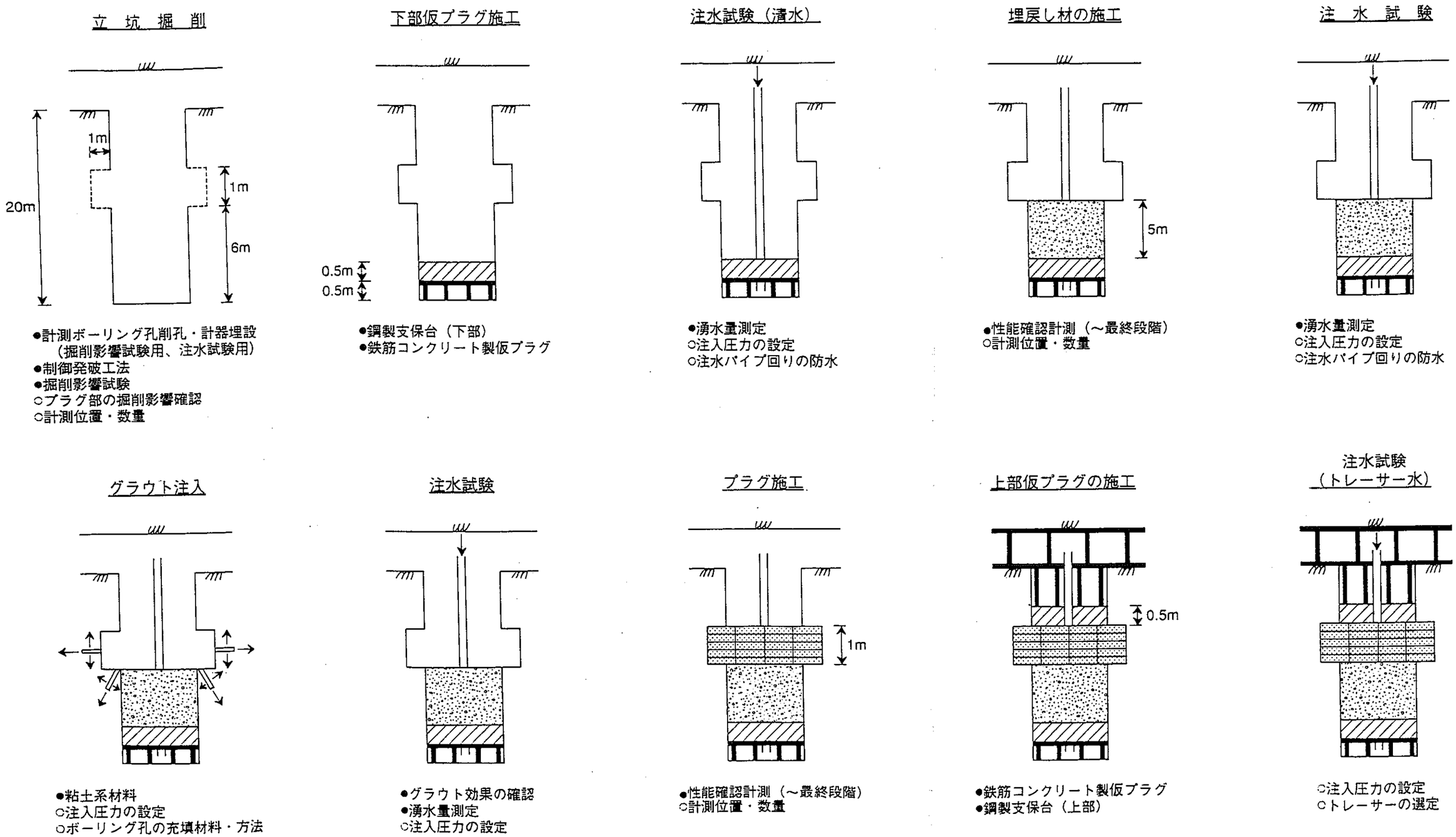
4.3.4 施工順序を変えた場合の試験概要

前項で示した２ケースの原位置試験設計では、いずれのケースにおいても、プラグ部のベントナイトの力学的安定性を補助するためのコンクリート製仮プラグにアンカーを使用していた。力学的側面からは岩盤中へのアンカー打設は問題にならないが、トレーサー等を用いた注水試験時にこのアンカー孔が水みちとなる可能性は皆無とは言えない。ＵＲＬサイトは堅硬な花崗岩から構成されているとは言え、断層・破砕帯等の不良地質部がこのアンカー部付近に存在した場合には、注水試験時のシーリング性能評価に悪影響を及ぼすことも十分考えられる。

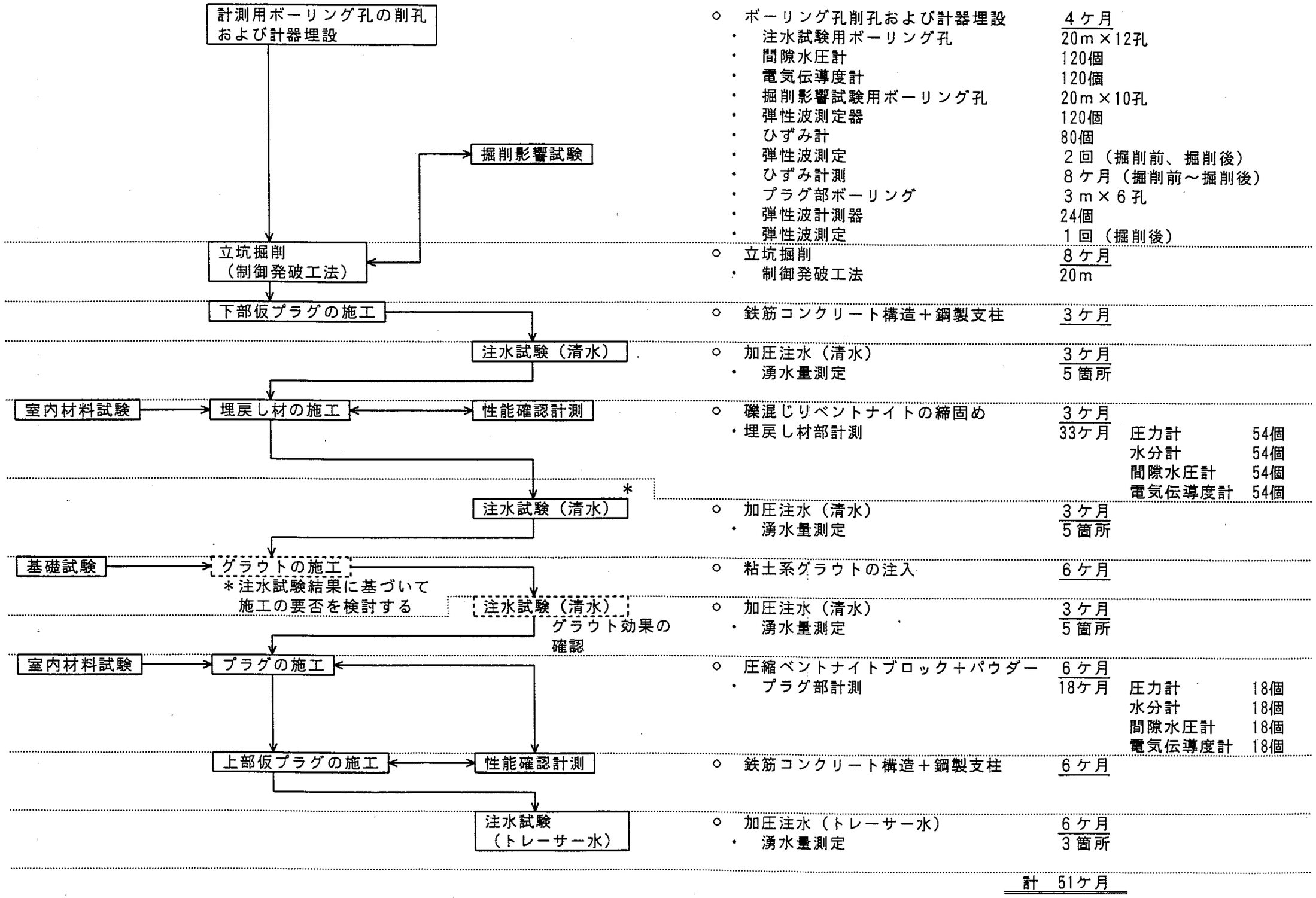
したがって、掘削した立坑付近の地質が良好でない場合も想定して、コンクリート製仮プラグにできるだけアンカーを用いなくて済むような原位置試験設計を行った。主な留意点は以下のとおりである。

- ○ コンクリート製仮プラグの設置箇所をできるだけ少なくする。
- ○ コンクリート製仮プラグをできるだけアンカーを用いずに岩盤自体で支持するようにする。

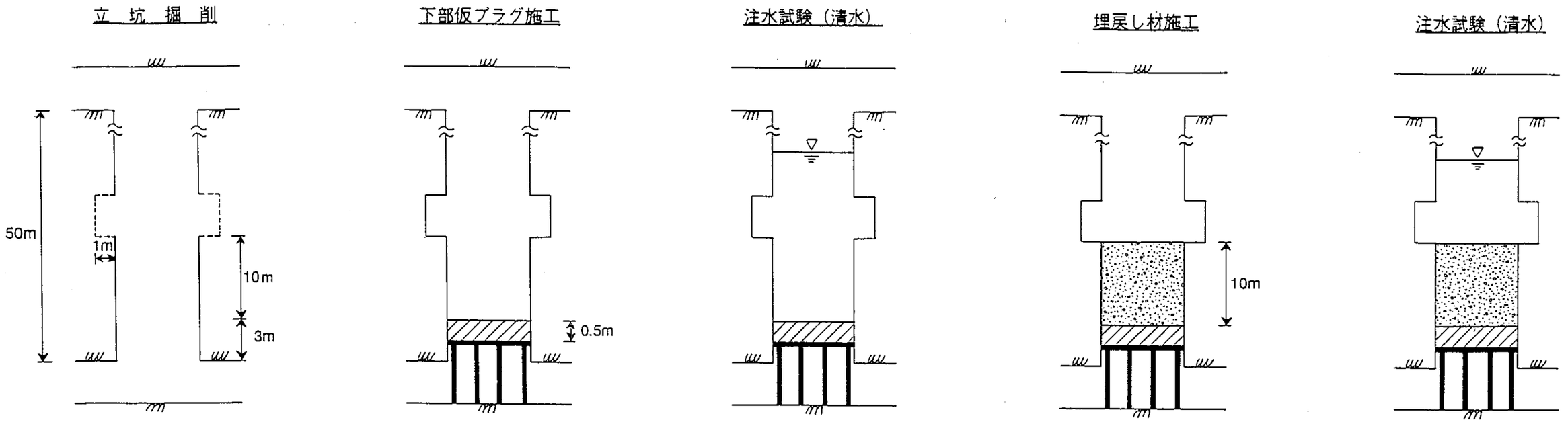
この結果、プラグ部と埋戻し部の施工を逆にする、すなわち、埋戻し部を先に施工し、後からプラグ部を施工する手順を用いた場合の原位置試験設計を行った。その結果を図－4.11～14に示す。

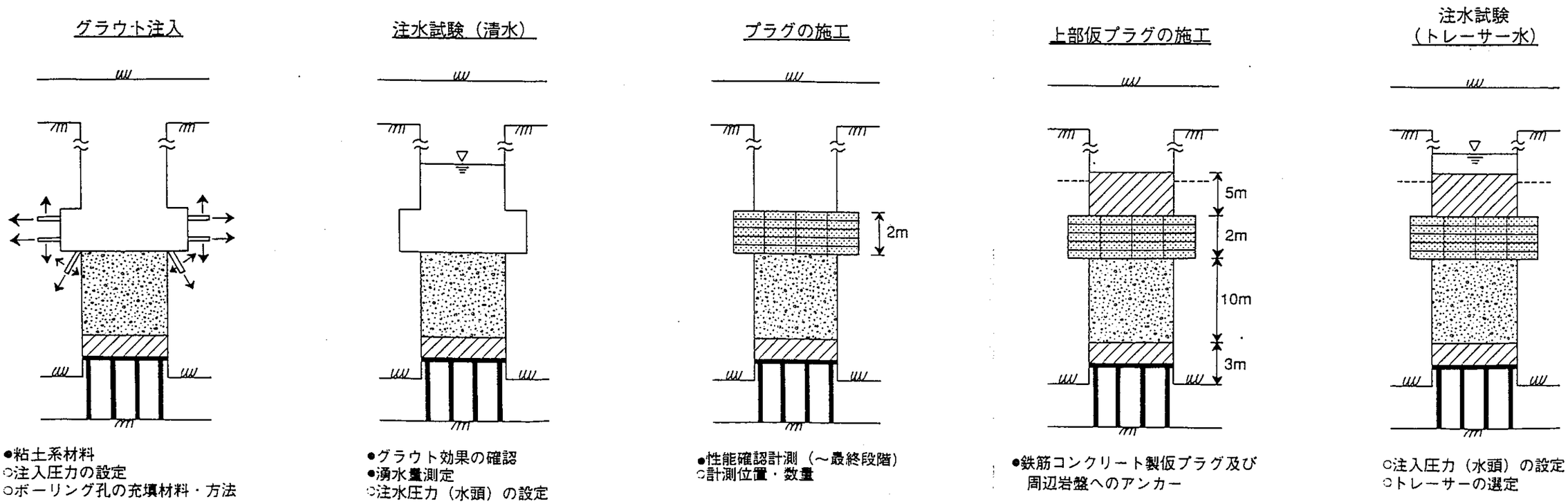


図－4.11　施工手順（オプション）



図－4.12　試験手順及び工程（オプション）


立　坑　掘　削
50m
1m
10m
3m
●計測ボーリング孔削孔・計器埋設
●導孔切上り機械工法+切下り制御発破工法
●掘削影響試験
○プラグ部の掘削影響確認
○計測位置・数量
下部仮プラグ施工
0.5m
●鋼製支保台（下部）
●鉄筋コンクリート製仮プラグ
注水試験（清水）
●湧水量測定
○注水圧力（水頭）の設定
埋戻し材施工
10m
●性能確認計測（～最終段階）
○計測位置・数量
注水試験（清水）
●湧水量測定
○注水圧力（水頭）の設定


グラウト注入
●粘土系材料
○注入圧力の設定
○ボーリング孔の充填材料・方法
注水試験（清水）
●グラウト効果の確認
●湧水量測定
○注水圧力（水頭）の設定
プラグの施工
2m
●性能確認計測（～最終段階）
○計測位置・数量
上部仮プラグの施工
5m
2m
10m
3m
●鉄筋コンクリート製仮プラグ及び
周辺岩盤へのアンカー
注水試験
（トレーサー水）
○注入圧力（水頭）の設定
○トレーサーの選定

図－4.13　施工手順

図－4.14　試験手順及び工程