

放射性廃棄物処分に用いる覆土の
設計・施工・品質管理の策定に向けた
ベントナイト系材料の物性評価に関する研究

2024 年 9 月

岩手大学大学院 理工学研究科

システム創成工学専攻

太田 征志

目次

第1章	序論.....	1-1
1.1	はじめに.....	1-1
1.1.1	放射性廃棄物について.....	1-1
1.1.2	放射性廃棄物の区分と発生.....	1-1
1.1.3	放射性廃棄物の種類に応じた処分方法.....	1-2
1.2	研究の背景.....	1-3
1.3	従来の研究と問題点.....	1-4
1.4	本研究の目的.....	1-5
1.5	本論文の構成.....	1-5
第2章	ベントナイトの材料特性.....	2-1
2.1	概説.....	2-1
2.2	ベントナイトの特性.....	2-1
2.2.1	ベントナイトの種類.....	2-1
2.2.2	ベントナイトの基本物性.....	2-3
第3章	覆土の基本設計.....	3-1
3.1	概説.....	3-1
3.2	廃棄物埋設地の設計の考え方.....	3-2
3.2.1	地下水面下への設置.....	3-2
3.2.2	移行抑制機能の設計.....	3-3
3.2.3	漏出防止機能の設計.....	3-4
3.3	廃棄物埋設地の基本的考え方について.....	3-6
3.3.1	廃棄物埋設施設の設置位置.....	3-6
3.3.2	廃棄物埋設設備の設置深度.....	3-7
3.4	第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方.....	3-7
3.4.1	地下水の流れの一般的な知見.....	3-7
3.4.2	覆土の構成.....	3-7
3.5	覆土の機能維持に関する考え方.....	3-8
3.5.1	覆土の不均質性に対する考え方.....	3-10
3.6	覆土の技術要件における考え方.....	3-11
3.6.1	覆土の低透水性.....	3-11
3.6.2	覆土の液状化抵抗性.....	3-12
3.7	覆土の基本設計.....	3-14
3.7.1	廃棄物埋設地の構成および設置位置.....	3-14
3.7.2	覆土の構成および要求性能.....	3-15

第4章	廃棄物埋設地の長期影響評価	4-1
4.1	概説	4-1
4.2	影響事象分析	4-1
4.2.1	各バリアに期待する性能	4-2
4.2.2	FEPの整理	4-3
4.2.3	影響事象分析の結果	4-3
4.3	力学的影響評価	4-15
4.3.1	影響事象の概要	4-15
4.3.2	検討手順	4-15
4.3.3	1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価	4-16
4.4	化学的影響評価	4-39
4.4.1	影響事象の概要	4-39
4.4.2	検討手順	4-39
4.4.3	影響評価	4-39
4.4.4	覆土の主な仕様	4-40
4.5	廃棄物埋設地の状態設定	4-67
4.5.1	状態設定の概要	4-67
4.5.2	検討手順	4-67
4.5.3	等価透水係数の設定	4-68
4.6	線量評価	4-69
4.6.1	線量評価に至るまでのフロー	4-69
4.6.2	線量評価結果	4-70
第5章	覆土の詳細設計	5-1
5.1	概説	5-1
5.2	設計検討	5-1
5.2.1	難透水性覆土	5-1
5.2.2	下部覆土	5-29
5.2.3	上部覆土	5-102
5.4	まとめ	5-135
5.4.1	難透水性覆土	5-135
5.4.2	下部覆土	5-135
5.4.3	上部覆土	5-136
第6章	覆土の施工性試験	6-1
6.1	概説	6-1
6.2	現地施工試験の概要	6-1
6.3	混合土の製造について	6-4

6.4	現地施工試験の結果.....	6-6
第7章	覆土の品質管理方法の検討.....	7-1
7.1	概説.....	7-1
7.2	覆土施工時における品質管理（案）.....	7-1
7.2.1	完了確認時における品質管理項目.....	7-1
7.2.2	材料納入時、覆土材料製造時および覆土施工時の品質管理項目.....	7-2
第8章	中性子イメージングを用いた土質系材料内部の観察.....	8-1
8.1	概説.....	8-1
8.2	中性子イメージングの適用性.....	8-2
8.2.1	実験装置と実験原理.....	8-2
8.2.2	基本的な実験手順.....	8-3
8.2.3	実験結果.....	8-5
8.2.4	実験手法の最適化.....	8-11
8.2.5	まとめ.....	8-15
8.3	MLF（J-PARC）を用いた砂とベントナイトの内部観察例.....	8-16
8.3.1	実験方法.....	8-16
8.3.2	実験結果.....	8-17
8.4	JRR-3を用いた砂の内部観察例.....	8-20
8.4.1	実験方法.....	8-20
8.4.2	実験結果.....	8-21
第9章	まとめ.....	9-1
9.1	基本設計～詳細設計.....	9-1
9.2	施工性試験～品質管理方法の検討.....	9-1
9.3	中性子イメージングを用いた土質系材料内部の観察.....	9-2
	引用文献.....	i

第1章 序論

1.1 はじめに

1.1.1 放射性廃棄物について

放射性廃棄物は「高レベル放射性廃棄物」と「低レベル放射性廃棄物」に大別される。

高レベル放射性廃棄物は、使用済燃料の再処理により生じる放射能レベルの高い廃液をガラス固化体にしたものである。なお、再処理せずに使用済燃料を直接処分する国の場合、使用済燃料そのものが高レベル放射性廃棄物となる。

低レベル放射性廃棄物は、放射能レベルや発生場所によって、さまざまな種類に分類・管理される。例えば、発電所廃棄物は、原子力発電所から発生する放射能レベルの極めて低いコンクリートや金属などや、比較的高い制御棒や炉内構造物などである。

1.1.2 放射性廃棄物の区分と発生

原子力発電の運転に伴い発生する放射性廃棄物を表 1.1-1 を示す。高レベル放射性廃棄物以外の放射性廃棄物を「低レベル放射性廃棄物」と呼ぶ。低レベル放射性廃棄物は、発生場所や放射能レベルによってさらにいくつかの区分に分けることができる。

表 1.1-1 放射性廃棄物の区分 [1]

廃棄物の種類			廃棄物の例	発生する施設
高レベル放射性廃棄物			ガラス固化体	再処理施設
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	高↑放射能レベル	放射能レベルの比較的高い廃棄物	原子力発電所
		放射能レベルの比較的低い廃棄物	廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化	
		放射能レベルの極めて低い廃棄物	コンクリート、金属等	
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物		燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設 MOX 燃料加工施設
	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設
クリアランスレベル以下の廃棄物			原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生源

1.1.3 放射性廃棄物の種類に応じた処分方法

放射性廃棄物の区分と処分方法を図 1.1-1 に示す。

放射性廃棄物の処分方法は、深さや放射性物質の漏出を抑制するためのバリアの違いにより、4つに分類される。

(1) トレンチ処分

コンクリートや金属など、化学的、物理的に安定な性質の廃棄物のうち放射能レベルの極めて低いものについては、トレンチ処分が行われる。これは、コンクリートピットなどの人工構造物を設置せず、浅地中に埋設処分する方法である。50年程度の管理期間を経た後は、一般的な土地利用が可能となる。

トレンチ処分は、日本原子力研究開発機構（JAEA）の動力試験炉（JRDR）の解体に伴って発生した廃棄物を対象に、同研究所敷地内で試験的に実施されている例がある。

(2) ピット処分

液体廃棄物を濃縮した廃液や放射能レベルの低い使用済み樹脂、可燃物を焼却した焼却灰などをセメントなどでドラム缶に固形化したものや、配管やフィルターなどの固形状の廃棄物で放射能レベルの比較的低いものは、浅地中にコンクリートピットなどの人工構造物を設置して埋設する方法で処分される。

放射性物質濃度の減衰に応じて段階的な管理を行うことになっており、放射性物質の漏出を防止するために人工構築物の積極的な補修を行う段階から、漏出状況を監視する段階を経て、最終的には放射性物質の濃度が十分低くなるまで埋設地の掘削を制限するなどの管理を行う。管理が必要な期間として、300～400年が一つの目安とされている。管理期間終了後は、一般的な土地利用が可能になる。

(3) 中深度処分

制御棒や炉内構造物など、炉心から生ずる廃棄物は「低レベル放射性廃棄物」のうち「放射能レベルの比較的高い廃棄物」に該当し、地上から深さ 70メートル以上の地下に設置された埋設地において処分されることになっている。これは、建造物の基礎や地下鉄、共同溝などの一般的な地下利用に対して十分に余裕をもった深度に、コンクリートでトンネル型やサイロ型の建造物をつくり、廃棄物を埋設処分する方法である。

「低レベル放射性廃棄物」のうち「放射能レベルの比較的高い廃棄物」についても、放射性物質濃度の減衰に応じた段階的な管理が可能であり、数百年の管理期間を経た後は、一般的な土地の利用が可能と考えられている。但し、具体的な管理の内容については現在検討が行われている。

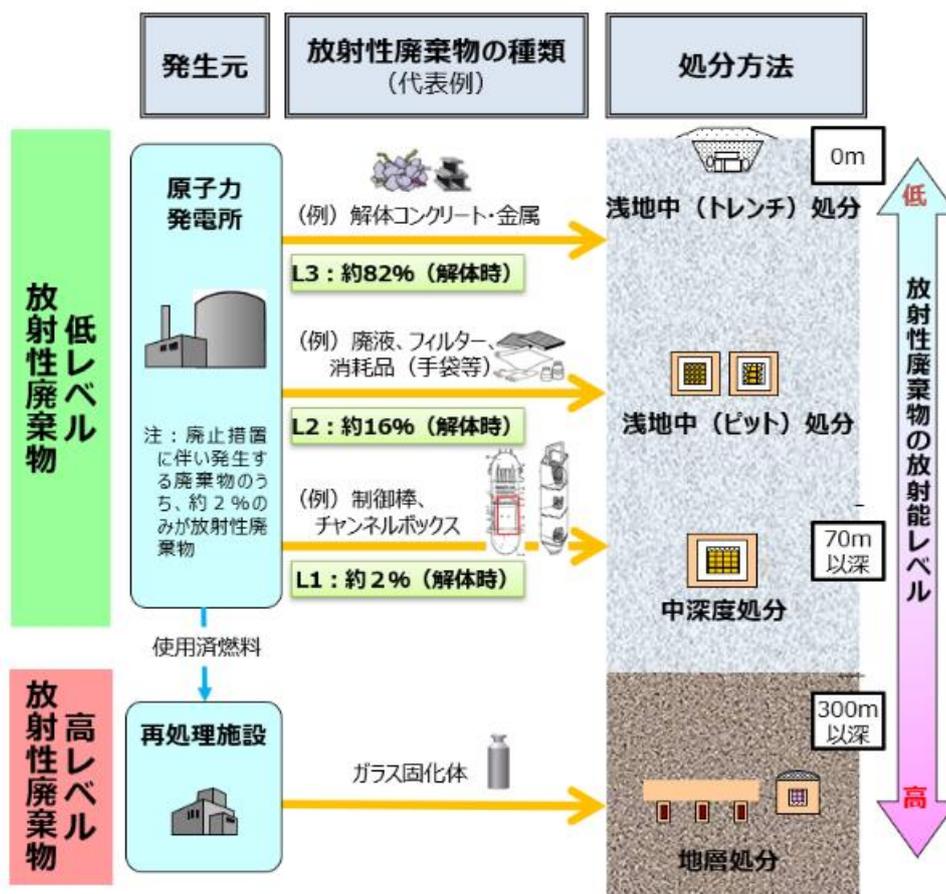


図 1.1-1 放射性廃棄物の区分と処分方法 [1]

1.2 研究の背景

放射性廃棄物処分では、前述したような長期にわたる将来の安全性を、現在の技術的知見に基づいて説明することが求められる。このための有効な考え方として、スウェーデン等諸外国の放射性廃棄物処分の安全規制において講じられてきた「技術的に最善の手段 (Best Available Technique, BAT) を考慮しなければならない」という概念がある。本研究では、放射性廃棄物処分のうち特に低レベル放射性廃棄物のピット処分に焦点を当て、BAT の概念を念頭に置き、ピット周辺に設置する覆土の設計・施工・品質管理 (基準・方法) の策定に向けたベントナイト系材料の物性評価に関する研究を行った。本研究で得られる知見は、覆土を用いた処分システム設計の一助となることから、放射性廃棄物処分の安全性確保のために必要かつ非常に重要なものである。

1.3 従来の研究と問題点

国内の低レベル放射性廃棄物埋設施設においては、人工バリアである覆土としてベントナイトと土砂の混合土を用いる計画である。覆土には移行抑制機能として低透水性や収着性などの複数機能が期待されており、特に低透水性は重要な設計要件となっている。加えて、放射性廃棄物施設特有の長期的な状態設定を行う必要があるため、初期性能の経年劣化を正しく評価することも求められる。しかしながら、経年劣化評価には解明されていない事象も存在することから、その部分について保守的な評価を行っており、処分システム全体として最も合理的な設計検討の余地を残した状況といえる。

そこで、基本的な設計検討プロセスを体系的に整理し、実施工を考慮した仕様を検討する必要がある。加えて、ベントナイト混合土が初期の低透水性を発現しているメカニズムを解明することにより、そのメカニズムに基づく経年劣化事象の理解が進み、合理的な設計の一助となると期待される。

経過年数に対する性能劣化のイメージについて図 1.3-1 に示す。

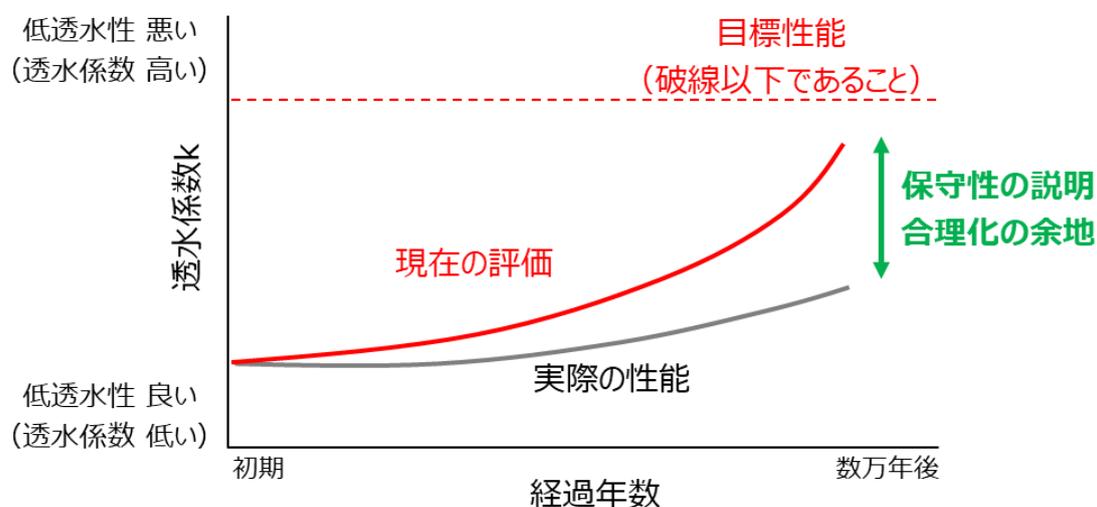


図 1.3-1 放射性廃棄物の区分と処分方法

1.4 本研究の目的

浅地中処分においてベントナイト混合土を用いる計画としており、国内では過去事例の無い初の取り組みである。また、地下水位以深に埋設設備を設置する設計概念については世界でも類を見ないものである。

ベントナイト混合土の材料選定、設計方法（長期影響評価含む）、施工方法および品質管理方法の策定を目的とし、低透水性の発現メカニズム解明を視野に入れて、ベントナイト系材料の物性評価に関する研究を行う。

1.5 本論文の構成

本論文は、次の9章から構成される。

第1章 序論

放射性廃棄物処分の概要および本研究の目的を示す。

第2章 ベントナイトの材料特性

ベントナイト混合土に用いるベントナイトの基本的な情報について整理する。

第3章 覆土の基本設計

放射性廃棄物処分の人工バリアである覆土に求められる要求性能を規定し、主な仕様を設定する。

第4章 廃棄物埋設地の長期影響評価

第3章で設定した覆土仕様をベースに、長期的な影響に対する安定性評価を行う。

第5章 覆土の詳細設計

実施工を見込んだ覆土の詳細仕様（具体的な材料、配合等）の詳細設計を行う。

第6章 覆土の施工性試験

実機を用いた施工性試験を行い、その結果を整理する。

第7章 覆土の品質管理方法の検討

第6章の成果を踏まえ、実施工時の品質管理方法について検討する。

第8章 中性子イメージングを用いた土質系材料内部の観察

ベントナイト混合土が初期の低透水性を発現しているメカニズムの解明を試みた研究結果を示す。

第9章 まとめ

第2章 ベントナイトの材料特性

2.1 概説

第1章で示した通り、国内の低レベル放射性廃棄物埋設施設においては、人工バリアである覆土としてベントナイトと土砂の混合土を用いる計画である。ベントナイトの工学的性質は、鉱物組成、モンモリロナイトのイオン型や含有量などによって変化するため、人口バリアである覆土の設計を行うにあたり、ベントナイトの特性を調査することは重要である。

2.2 ベントナイトの特性

2.2.1 ベントナイトの種類

本項では、山本らによる既往研究成果 [2]を用いて、産地や性状の異なる複数の国内産ベントナイトの特性データを整理した。表 2.2-1 にベントナイトの種類、図 2.2-1 にベントナイトの外観、図 2.2-2 にベントナイト鉱山の立地を示す。

それぞれ国内の異なる鉱山で産出される山形県月布産（クニゲル V1）、青森県黒石産（白神）、新潟県細越産（天竜原鉱）、新潟県三川産（三川原鉱）、群馬県富岡産（富岡原鉱）、島根県鏡山産（関西ベントナイト）のベントナイトである。

表 2.2-1 ベントナイトの種類 [2]

	クニゲル V1 [KV]	天竜原鉱 [TG]	白神 [SK]	三川原鉱 [MG]	富岡原鉱 [TM]	関西 ベントナイト [IZ]
鉱山	月布	細越	黒石	三川	富岡	鏡山
陽イオン型	Na 型	Na 型	Na 型	Ca 型	Ca 型	Ca 型
会社名	クニミネ工業	関ベント鉱業	日本鉱研	ホーゲン	ホーゲン	カネン工業



図 2.2-1 ベントナイトの外観 [2]

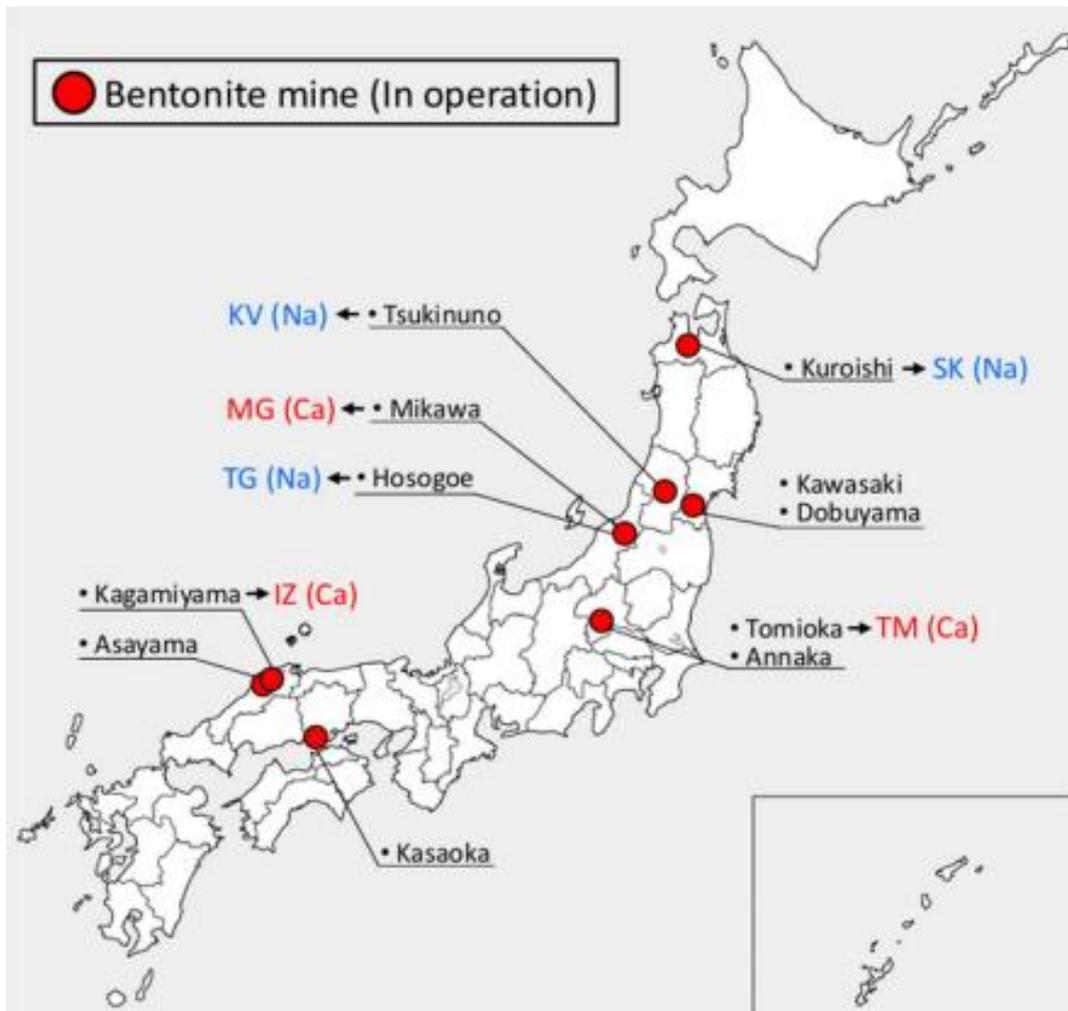


図 2.2-2 ベントナイト鉱山の立地 [2]

2.2.2 ベントナイトの基本物性

表 2.2-2 にベントナイトの基本物性を示す。具体的な試験方法については、山本らによる既往研究成果 [2] を参照。

Na 型と Ca 型の違いにより、特に液性限界に顕著な差がみられることから Na 型の保水性が高いことが分かる。あわせて膨潤力も Na 型の方が高い傾向がみられる。

実際に覆土を施工する時期によって、天然材料であるベントナイトの特性や供給状況が変動する可能性もあることから、必要なベントナイトが調達できるかどうかの判断も踏まえて、ベントナイトを選定する必要がある。

表 2.2-2 ベントナイトの基本物性 [2]

	ケゲル V1 [KV]	天竜原鈇 [TG]	白神 [SK]	三川原鈇 [MG]	富岡原鈇 [TM]	関西 ベントナイト [IZ]
陽イオン型	Na 型	Na 型	Na 型	Ca 型	Ca 型	Ca 型
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.768	2.675	2.605	2.574	2.576	2.442
D50(μm)	10.1	5.9	7.0	19.4	26.7	16.7
自然含水比(%)	7.9	8.0	4.7	7.0	9.1	7.6
液性限界 w _L (%)	436.4	238.9	324.5	93.6	87.2	107.3
塑性限界 w _p (%)	26.4	39.8	28.8	30.3	28.7	31.3
塑性指数 I _p	410.0	199.1	295.7	63.3	58.5	76.0
MB 吸着量 (mmol/100g)	73	102	96	73	71	45
pH	10.3	9.9	10.4	9.0	9.5	10.0
電気伝導度 (mS/m)	30.1	13.7	11.5	4.3	7.6	9.5
Na/Ca 比	5.74	3.81	1.89	0.35	0.01	0.81
膨潤力(mL/2g)	20.0	15.5	16.0	7.5	5.5	7.0

第3章 覆土の基本設計

3.1 概説

廃棄物埋設地（埋設設備、排水・監視設備および覆土の総称）の設計の考え方を整理したのちに、覆土の基本設計について本章に示す。

現時点の廃棄物埋設地の状況を図 3.1-1 に示す。



図 3.1-1 現時点の廃棄物埋設地の状況

3.2 廃棄物埋設地の設計の考え方

廃棄物埋設地の設計は、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できることが重要である。

廃棄物埋設地は、当初、地表面付近の地下水面より上に設置することも考えられたが、廃止措置の開始後、保全の措置を必要としない状況に移行できるようにすることを考慮して地下水面下に設置することとした。（詳細は後述）

その上で、できるだけ保修に頼らない移行抑制機能が達成できるように設計するとともに、漏出防止機能を設計する。

受入れ開始から廃止措置までの期間における管理と期待する安全機能を図 3.2-1 に示す。

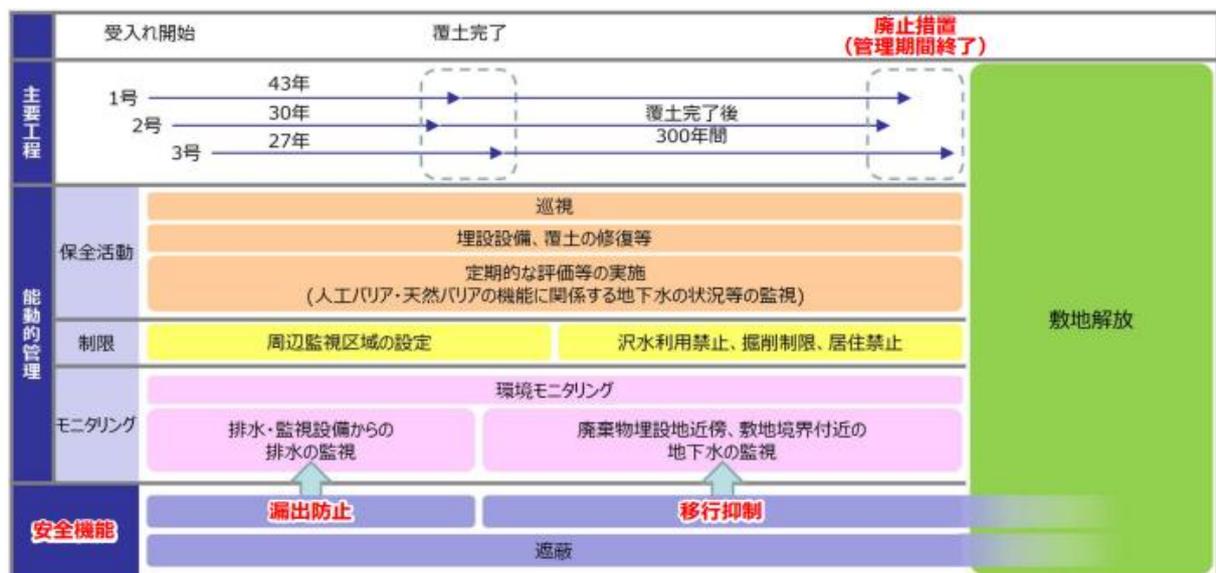


図 3.2-1 受入れ開始から廃止措置までの期間における管理と期待する安全機能

3.2.1 地下水面下への設置

保全の措置を必要としない状況に移行できるようにする観点で、地下水面上への設置（地表近くの不飽和帯設置）と地下水面下への設置（岩中設置）とを比較した結果、地下水面下への設置が有利と判断した。理由は以下の通り。

- ・地下水面上に設置すると、第四紀層に設置することになり、岩盤よりも柔らかい土壌内への設置となる。

- ・地下水面上に設置すると、凸型の覆土形状とする必要があるが、廃止措置後に跡地利用で凸部周辺への盛土により平坦に造成され、不飽和帯に地下水位が及ぶことにより、結果的に地下水面下への設置となる可能性がある。
- ・地下水面上への設置は、地表面に近く、人間侵入リスクが相対的に高い。

一方で、地下水面下への設置となると、完全な防水は不可能であり、漏出防止機能の設計においては、できるだけ不飽和状態を維持することおよび浸入した水の放射性物質濃度を管理することに対応した設計が必要となる。

3.2.2 移行抑制機能の設計

移行抑制機能は、覆土完了後、人工バリアおよび天然バリアの組合せにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の移行を抑制する機能を有する設計とする。

<前提条件>

- ・地下水面下への設置となったため、覆土施工後は最初から地下水に水没した状態を想定する。
- ・外周仕切設備等で使用するセメント系材料の物理的移行抑制機能（低透水性）は、ひび割れが入ると、設備の等価な透水係数が1オーダーから2オーダー大きくなることが予想される。設備をどのような防水材で覆っても、防水材の長期性能の評価は難しいことから、埋設設備には物理的移行抑制機能（低透水性）を期待しない設計とする。

<埋設設備の設計の考え方>

- ・埋設設備は金属の腐食で比較的短期間（千年以内）に膨張や陥没で変形する可能性があるが、埋設設備は覆土直後から砂程度の透水性であっても安全性が確保できる設計とする。

<覆土の設計の考え方>

- ・廃棄物埋設地は新第三紀の岩盤の上に厚さ数 m～10m 程度の第四紀層が載った台地上にあり、埋設設備設置地盤付近の間隙水圧測定結果から、地下水が下向き成分を含む横方向に流れている。埋設設備を岩盤(鷹架層)に掘り込んで設置し、埋設設備の周囲を岩盤(鷹架層)相当の透水性の低い覆土で覆い、埋設設備から漏出した放射性物質が地表面方向に流れ難くする。覆土は天然の材料を用い、埋設設備の膨張や陥没に対する変形に追従することを考慮する。

- ・覆土は、長期の化学的および力学的影響による性能の低下を考慮して、覆土の初期の性能を高く設定し、漏出防止機能を期待する期間が終了した直後に埋設設備が砂程度の透水性となったと仮定しても、廃止措置の開始までの敷地境界付近における公衆の受ける線量が小さくなるよう、地下水中の放射性物質濃度を十分低減できる高い移行抑制機能を持つ設計とする。

<まとめ>

- ・防水材の長期性能の評価は難しいことから移行抑制機能は覆土によって確保し、セメント系材料の物理的移行抑制機能（低透水性）を最初から期待しない設計とする。
- ・移行抑制機能は、覆土完了後、覆土の低透水性および収着性と、セメント系材料の化学的移行抑制機能（収着性）で達成する設計とする。

移行抑制機能の概念図として、放射性物質を含む地下水の移行イメージを図 3.2-2 に示す。

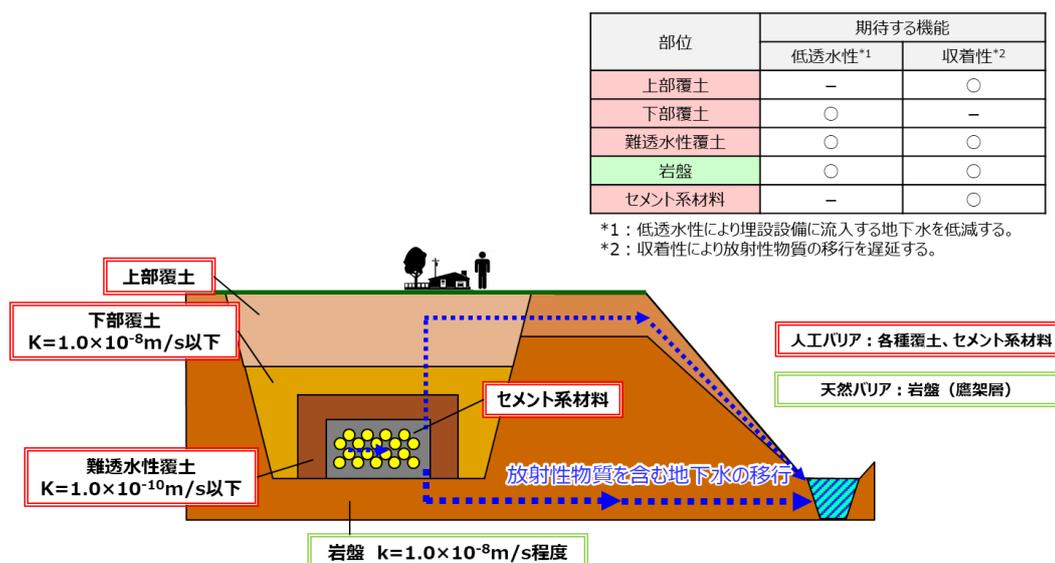


図 3.2-2 放射性物質を含む地下水の移行イメージ

3.2.3 漏出防止機能の設計

<漏出防止の目的>

- ・漏出防止の目的は、全てのバリアが完成するまでに、放射性物質が廃棄体の外へ漏出することによる被ばくの防止と、移行抑制機能の評価の前提を確保することである。そのため、放射性物質がバリアの内側にある状態に管理することを基本方針とする。

<漏出防止設計の考え方>

- ・漏出防止の範囲は、外周仕切設備および覆いの内側とし、その外側のバリア等における放射性物質の濃度が敷地境界付近における水中濃度限度に比較して十分小さくなるように管理する。
- ・埋設設備は漏出防止期間中においても、覆土施工期間中の後期は、地下水面下にある可能性がある。前述のとおり、コンクリートに貫通するわずかなひび割れでも水は浸入するため、覆土期間中に廃棄体に水が完全に接触しない確実な防水を保証することは容易でない。そこで、完全防水を目指す設計ではなく、できるだけ廃棄体周りを不飽和状態として、設備に浸入した水を管理することを漏出防止設計の基本とする。
- ・放射性物質はドラム缶の中に固型化されており、ドラム缶から移行するには、基本的にその移行媒体である水がドラム缶の周囲に存在する必要がある。したがって、漏出防止期間においては、できるだけ廃棄体の周囲が水で満たされた状態でない不飽和にすることを考える必要がある。また、覆土施工開始後は、埋設設備は地下水面下となる可能性があり、廃棄体周囲が飽和状態となることも否定できない。そのため、廃棄体周囲が仮に飽和状態となり、廃棄体から放射性物質の移行が認められた場合でも、放射性物質を含んだ水を管理された状態にすることを考える必要がある。

漏出防止機能の概念図として、埋設設備周囲の水の侵入および漏出防止イメージを図 3.2-3 に示す。

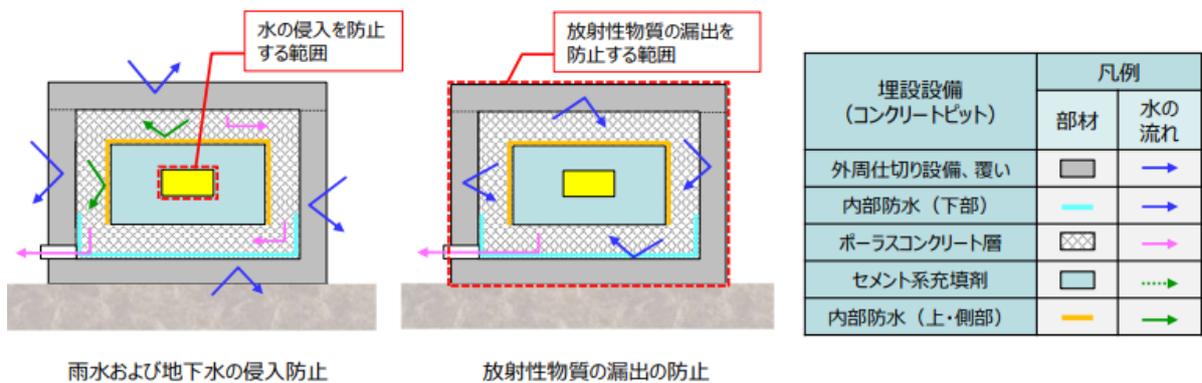


図 3.2-3 放射性物質を含む地下水の移行イメージ

3.3 廃棄物埋設地の基本的考え方について

現時点で最も新しい3号廃棄物埋設施設（建設中）を基本例とし、廃棄物埋設地の基本的な考え方について以下に示す。

3.3.1 廃棄物埋設施設の設置位置

3号廃棄物埋設地の設置位置の選定に当たっては、以下のことに配慮した。

- (i) 「許可基準規則」第三条を受け、変動地形が判読されない地盤、直下に活断層がない地盤、また地すべり地形が判読されない台地上に設置する。
- (ii) 「許可基準規則」第五条を受け、津波による遡上波が到達しない十分高い場所に設置する。
- (iii) 廃棄物埋設地を通過した地下水が、水理地質情報を把握している敷地内を通過し、尾駮沼側に流れるよう、地下水の分水界の南側に設置する（図 3.3-1 参照）。
- (iv) 長期的に機能を維持する観点から、比較的岩盤(鷹架層)出現深度が浅い場所で、かつ、侵食抵抗性の観点から中央沢から離して設置する。

これらを考慮した結果として、3号廃棄物埋設地は分水界の南側に位置している。

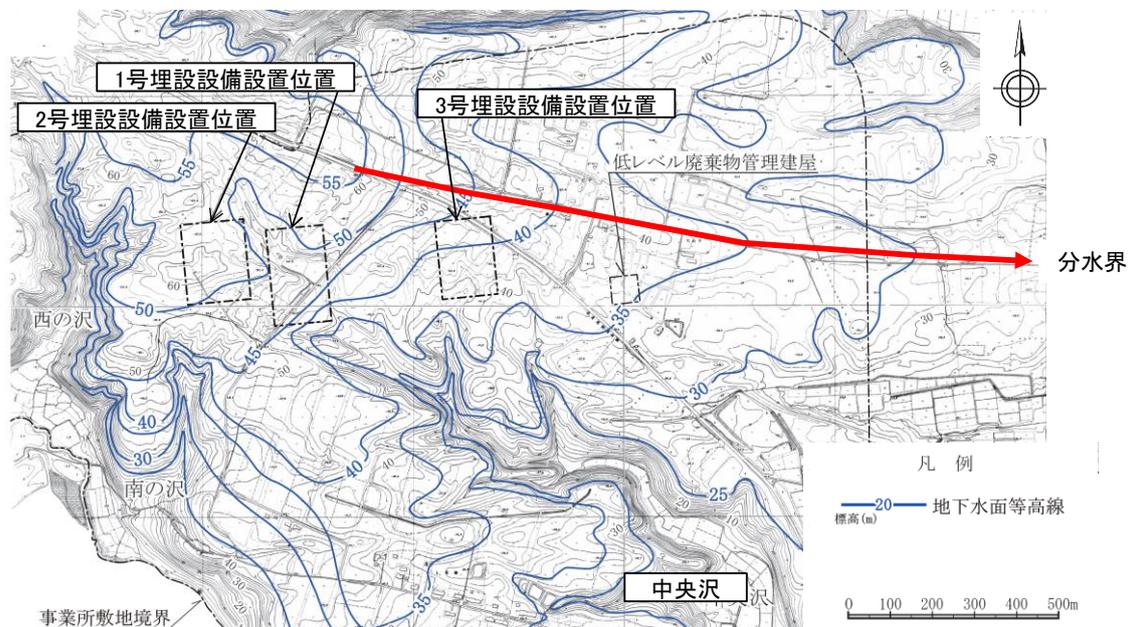


図 3.3-1 地下水面等高線図（1986年）

3.3.2 廃棄物埋設設備の設置深度

埋設設備の設置深度は、以下の点を考慮し設定する。設置深度を図 3.3-2 に示す。

- (i) N 値 50 以上の岩盤(鷹架層)上へ設置する。
- (ii) 掘削前の第三紀層(鷹架層) 推定レベル以下へ埋設設備全体を埋設する。

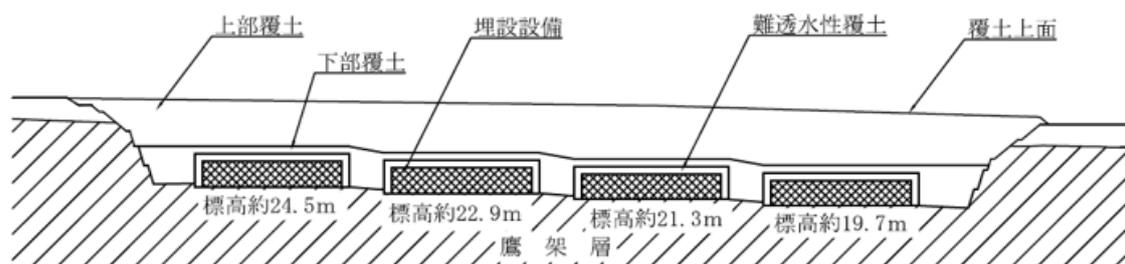


図 3.3-2 3号廃棄物埋設地の設置深度（南北断面図）

3.4 第四紀層との隔離を安定的に確保する考え方

3.4.1 地下水の流れの一般的な知見

埋設設備設置地盤付近の間隙水圧測定結果および広域的な地下水の流れの一般的な知見から、地下水が下向き成分を含む方向に流れている。これは広域的な地形的要因によるため、将来においても大まかな傾向は変わらないと考えられる。

3.4.2 覆土の構成

埋設設備から放射性物質が漏出した場合であっても、埋設設備底部から岩盤(鷹架層)中に移行させることで、地表近傍への放射性物質の移行を抑制できるよう、埋設設備の側面および上部を難透水性覆土で覆う。また難透水性覆土の外側に下部覆土を設置し、下部覆土の上面に上部覆土を設置する。

これにより、埋設設備を通過した地下水は上方の第四紀層ではなく、下方の岩盤(鷹架層)へ向かって流れ、覆土による移行抑制機能について、流量が多い第四紀層との隔離を安定的に確保できる設計とする。なお、覆土の透水係数は岩盤(鷹架層)相当以下にすることで、設備設置後も地下水が下方の岩盤(鷹架層)へ向かって流れる状況が保たれる。

3.5 覆土の機能維持に関する考え方

覆土に対する技術要件である透水特性(低透水性)を長期的に維持する上で考慮すべき技術要件には化学的安定性、変形追従性、液状化抵抗性がある。これらの要件に対して、覆土が部分的に性能劣化する不均質な状態も考慮して設計する。

設計方針を表 3.5-1 に記載する。

表 3.5-1 技術要件と設計方針

技術要件	設計方針
化学的安定性	長期にわたり低透水性を維持する観点から、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質材料を使用する。
変形追従性	覆土が力学的変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として施設通過流量を増加させないよう多層構造とする。 また、長期な化学的影響および力学的変形に対する難透水性覆土の性能については透水性能を低減させて評価している。
液状化抵抗性	難透水性覆土および下部覆土については、材料にベントナイトを用いた覆土で、締め固めた土であるとともに、粒径分布に広がりを持った材料であることから、容易に液状化し難い設計とする。

また、上記の技術要件以外に、覆土の性能に影響する事項として、侵食、生物学的事象、地表からの化学影響および熱影響、一般土地利用、覆土のすべりならびに廃棄物の重量による沈下についても考慮している。

これらに対する設計方針を表 3.5-2 に記載する。

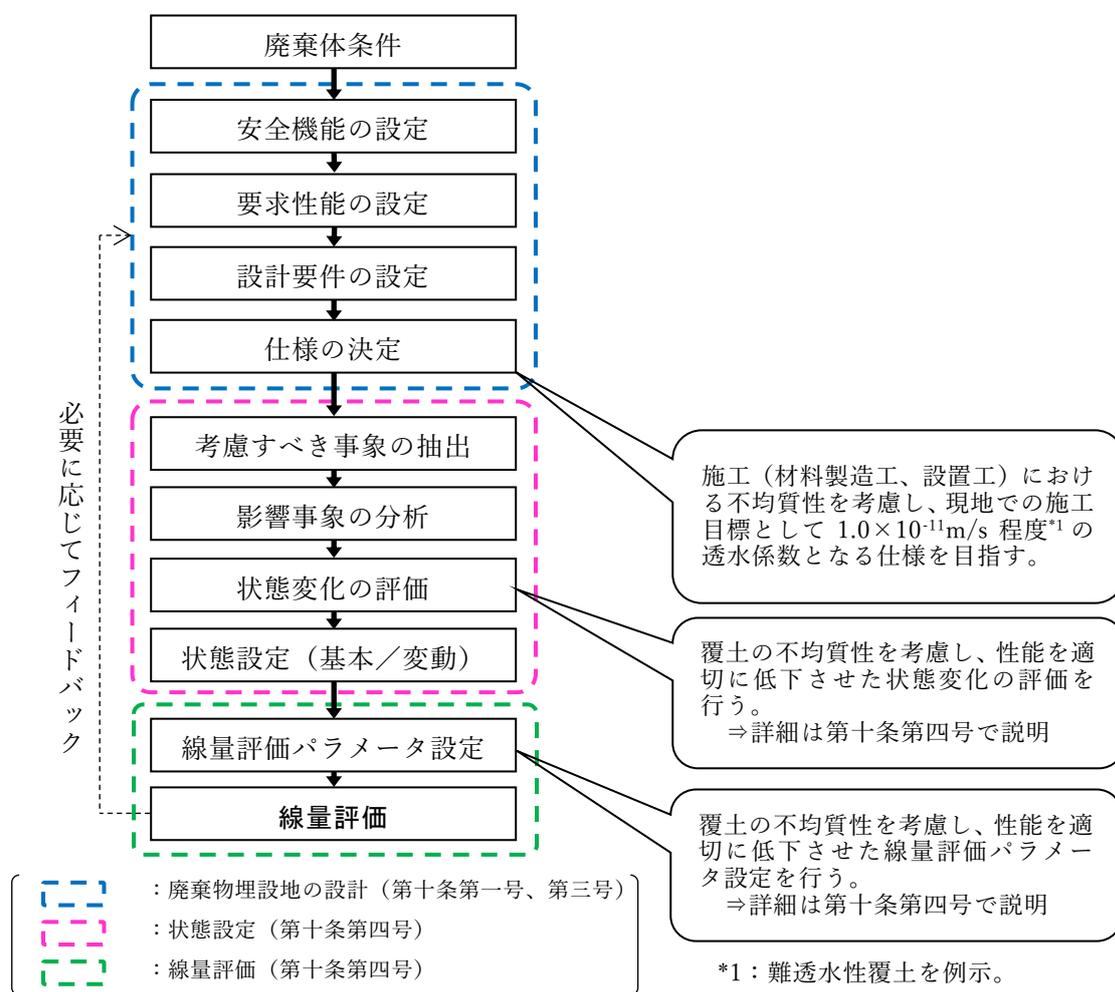
表 3.5-2 その他の考慮事項に対する設計方針

その他の 考慮事項	設計方針
侵食	敷地内の中央沢の枝沢からの侵食に対し、1 万年後においても難透水性覆土が露呈しないよう設計する。
生物学的事象	樹木根およびモグラ類による影響に対し、十分な上部覆土の厚さを確保して設計する。
地表からの化学 影響（酸性雨）	地表からの化学影響として酸性雨に対するベントナイトの劣化影響を考慮し、十分な上部覆土の厚さを確保した設計とする。
地表からの熱影 響（火砕物密度 流）	地表からの熱影響として最も懸念される火砕物密度流に対する、ベントナイトの劣化影響を考慮し、十分な上部覆土の厚さを確保した設計とする。
一般土地利用	六ヶ所での一般的な土地利用による掘削を考慮し、十分な覆土の厚さを確保した設計とする。
覆土のすべり	廃棄物埋設地は、地すべり地形が判読されない安定した中位段丘面に設置する。また覆土は、埋設設備を設置するために掘削した領域を埋めて原形復旧した形状とし、覆土のすべりが生じない設計とする。
廃棄物の重量に よる沈下	埋設設備を、N 値が 50 以上の十分な支持性能を有する岩盤(鷹架層)に設置することにより、廃棄物の重量による埋設設備の沈下およびそれに伴う覆土の沈下が生じない設計とする。

3.5.1 覆土の不均質性に対する考え方

廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るフローおよび覆土の不均質性に対する考慮事項について、図 3.5-1 に示す。

廃棄物埋設地における覆土は、覆土材料自体のばらつきおよび施工の不確実性に起因する不均質性を含んでいる。廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るまでの間、覆土の不均質性については、設計における考慮および評価における考慮を行っている。その評価結果によっては、必要に応じて設計にフィードバックを行うことで、覆土の不均質性を考慮した最適化された設計となっていると考える。



参考：土木学会、余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方(2008)

図 3.5-1 廃棄物埋設地の設計から線量評価に至るフロー

3.6 覆土の技術要件における考え方

3.6.1 覆土の低透水性

十分な低透水性を有することを達成するため、難透水性覆土および下部覆土は、設計透水係数および設計厚さを確保するものとする。

砂を母材としてベントナイト(クニボンド相当)を使用したベントナイト混合土で構成される難透水性覆土を対象に、ベントナイト混合率および含水比をパラメータスタディした透水試験(地盤工学会基準 JGS 0312-2018 相当)の結果を図 3.6-1 に示す。透水係数と含水比の関係において、その曲線の極小を生じる含水比は、一般に最適含水比よりわずかに高い含水比になることで知られており [3]、本試験結果においても同様の傾向を確認できる。最適含水比(w_{opt})+2%~6%において相対的に透水係数が低く、ベントナイト混合土を 20%以上混合し、含水比を最適含水比(w_{opt})+4%±2%の範囲内とすれば、設計透水係数 $k=1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を確保できる。よって、砂を母材としてベントナイト(クニボンド相当)を使用したベントナイト混合土を用いた場合、低透水性を必要とする難透水性覆土のベントナイト混合率は 20%~30%程度とする。

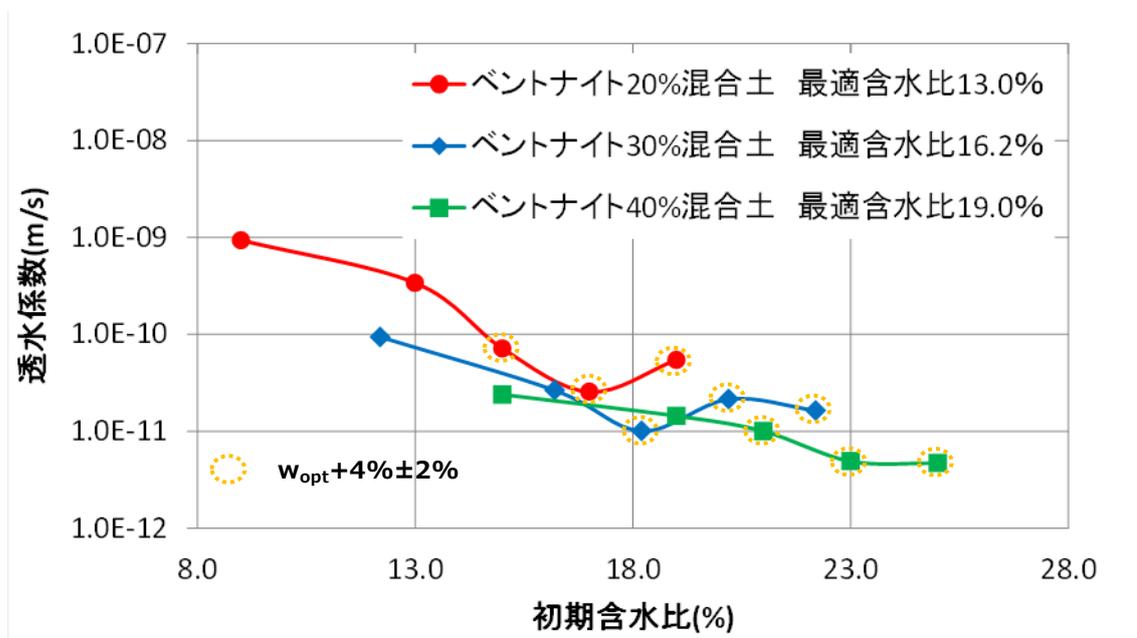


図 3.6-1 ベントナイト混合率ごとの含水比と透水係数の関係

3.6.2 覆土の液状化抵抗性

液状化抵抗性を確認するための液状化判定方法が各種提唱されており、それらは地盤の材料特性（粒度、密度および液状化強度）をパラメータとして用いている。しかしながら、覆土材料は、材料調達状況を考慮した実際の覆土施工時に行う施工試験結果を踏まえて、材料および施工のばらつきを考慮して最終決定することとしている。そのため、過去の液状化対策事例を参照し、覆土の液状化抵抗性を評価する。

過去の液状化対策事例として、平成 19 年新潟県中越沖地震において、管理値(締固め度 90%以上)を設定し、埋戻し土(砂、砂質土)の締固めによる対策を実施した箇所では、震度 6 弱が発生しているものの、液状化被害は生じていないと報告されている [4]。

一方で、覆土は現地発生土、購入砂、ベントナイトおよび礫を仕様に応じて混合した混合土であり、一般に液状化しやすいと知られている「砂分を多く含む、粒度分布が偏った土砂」ではない。過去の液状化対策事例において液状化をしていない箇所で使用されている砂および砂質土（図 3.6-2 に粒径加積曲線を示す）と比較して、覆土は、液状化抵抗性に関連する締固め性能が良いとされている「粒径分布に広がりを持った材料」であるため、相対的に液状化し難い材料であると判断される。

廃棄物埋設地で発生すると考えられる地震は震度 5 強を超えないため、過去事例における締固めによる対策を実施した箇所で発生した地震より小さい。

以上のことから、覆土は液状化抵抗性があり、施工時に管理値(締固め度 90%以上)を設定することで、廃棄物埋設地で発生する地震に対して液状化は生じないと考えられる。覆土材料を確定させる際には、道路土工 [5]における液状化判定の引用元である道路橋示方書 [6]に示されるような液状化判定法による確認を実施する。

参考として、図 3.6-3 に覆土材料として想定している購入砂、ベントナイトおよび礫と同等な材料として、豊浦砂、海成粘土、段丘礫層の粒形加積曲線の例 [7]を示す。これらの材料を混合し覆土を製造することから、購入砂単体と比較し、粒度分布に広がりを持つ液状化し難い材料であると考えられる。

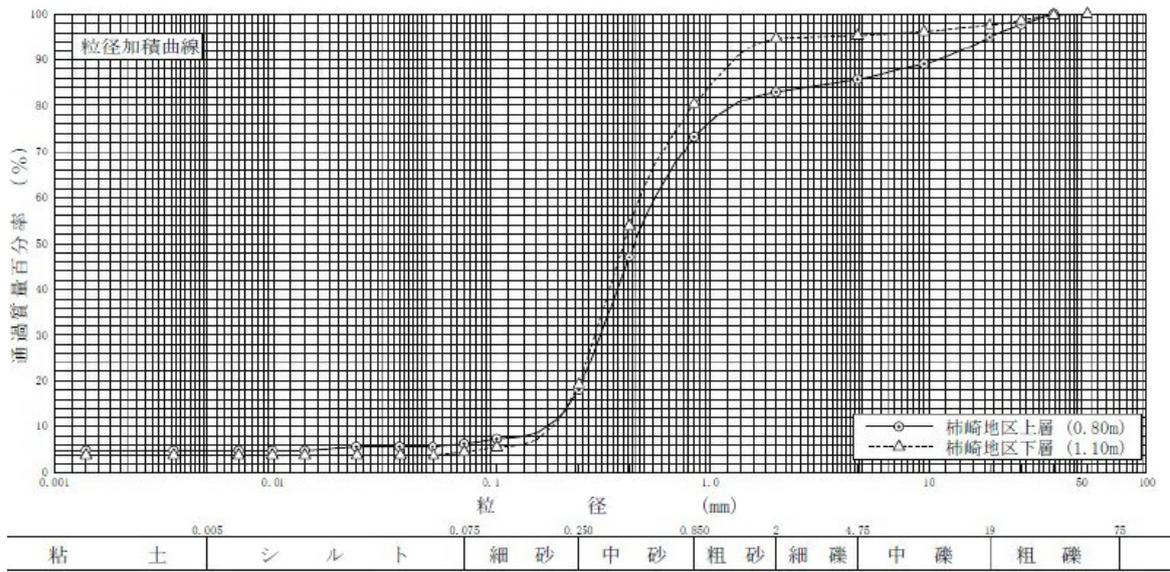


図 3.6-2 過去の液状化対策事例に用いている埋戻し土(砂、砂質土)の粒径加積曲線 [4]

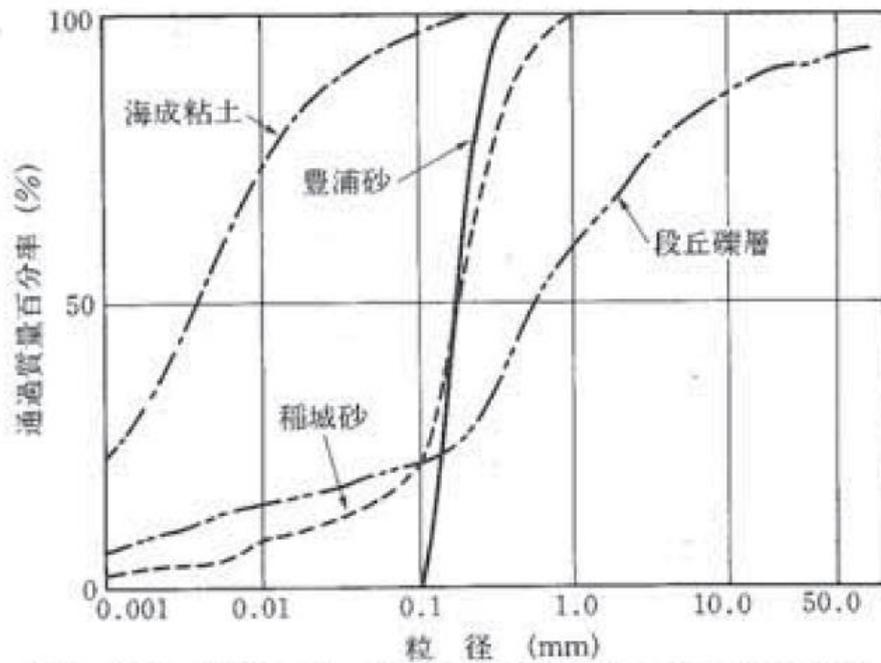


図 3.6-3 代表的な土の粒径加積曲線の例 [7]

3.7 覆土の基本設計

前述の考え方を踏まえた廃棄物埋設地の概要および覆土の基本設計（要求性能）は以下の通り。

3.7.1 廃棄物埋設地の構成および設置位置

廃棄物埋設地は、管理建屋から運搬した廃棄体を埋設する場所であり、埋設設備、排水・監視設備および覆土により構成する。

(1) 1号廃棄物埋設地

1号廃棄物埋設地は、敷地のほぼ中央北寄りに位置し、廃棄体最大 40,960m³(200L ドラム缶 204,800 本相当)を埋設する。

1号埋設設備は、1基当たり廃棄体約 1,024m³(200L ドラム缶 5,120 本相当)を埋設する埋設設備 5基を 1埋設設備群とする埋設設備群 8群で構成し、東西方向に 5基、南北方向に 8基配置する。現造成面(標高約 45m~46m)基準から約 14m~19m 掘り下げて、標高約 26m~32m となるように構造物を安定的に支持できる N 値 50 以上の岩盤(鷹架層)に設置する。

(2) 2号廃棄物埋設地

2号廃棄物埋設地は、1号廃棄物埋設地の西側に位置し、廃棄体最大 41,472m³(200L ドラム缶 207,360 本相当)を埋設する。

2号埋設設備は、1基当たり廃棄体約 2,592m³(200L ドラム缶 12,960 本相当)を埋設する埋設設備 2基を 1埋設設備群とする埋設設備群 8群で構成し、東西方向に 4基、南北方向に 4基配置する。現造成面(標高約 52m)基準から約 16m~21m 掘り下げて、標高約 31m~36m となるように構造物を安定的に支持できる N 値 50 以上の岩盤(鷹架層)に設置する。

(3) 3号廃棄物埋設地

3号廃棄物埋設地は、1号廃棄物埋設地の東側に位置し、廃棄体最大 42,240m³(200L ドラム缶 211,200 本相当)を埋設する。

3号埋設設備は、1基当たり廃棄体約 5,280m³(200L ドラム缶 26,400 本相当)を埋設する埋設設備 8基で構成し、東西方向に 2基、南北方向に 4基配置する。現造成面(標高約 41m~46m)基準から約 21m 掘り下げて、標高約 20m~25m となるように構造物を安定的に支持できる N 値 50 以上の岩盤(鷹架層)に設置する。

3.7.2 覆土の構成および要求性能

(1) 構成および安全機能

覆土は、難透水性覆土、下部覆土および上部覆土により構成する。

難透水性覆土および下部覆土は、低透水性により放射性物質の移行を抑制し、遮蔽性により放射線の遮蔽を行う。

なお、評価において収着性による移行抑制機能を期待できる設計とする。

(2) 要求性能

安全機能を確保するために必要な要求性能を整理する。

覆土の部位ごとに設定した要求性能および設計要件を表 3.7-1 に示す。

① 技術要件および設計項目

a. 移行抑制機能

覆土の移行抑制機能は、埋設設備内を通過する地下水の流量を低減することである。埋設設備からの流出水量は覆土の透水特性によって影響を受けることから、覆土に対する技術要件は透水特性(低透水性)であり、その設計項目は透水係数および厚さである。

また、移行抑制機能については、長期にわたり機能を維持する必要があるため、透水係数および厚さの変化に影響を及ぼす要因について抽出する。長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構を表 3.7-2 に示す。影響要因の抽出については、周辺岩盤などの外部環境も含めた施設の構成および影響要因の相互作用を網羅的に考慮する。抽出した要因は、廃棄物埋設地の覆土完了後の再冠水による水との接触に伴う、ベントナイト特性の変化、有効粘土密度の変化および短絡経路の形成である。長期における覆土の技術要件は、これらの要因に対する長期機能維持特性(化学的安定性、変形追従性および液状化抵抗性)であり、その設計項目は透水係数、厚さおよび締固め度である。

なお、覆土には、移行抑制機能に対する技術要件として、土質系材料が有する収着性を考慮するが、その設計項目は設定せず、収着性への影響を確認した材料を使用する設計とする。

b. 遮蔽機能

覆土の遮蔽機能は、放射線を遮蔽する機能であるため、技術要件は遮蔽性であり、その設計項目は密度および厚さである。

表 3.7-1 覆土の要求性能および設計要件

安全機能	要求性能		設計項目	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土	設計要件
	技術要件 (必要な特性)						
移行抑制機能	透水特性	低透水性	透水係数	○	○	—	必要な透水係数を有すること。
			厚さ	○	○	—	必要な厚さを有すること。
	核種 収着性	収着性	—	—	—	—	設計項目を設定しない(評価において、覆土が副次的にもつ性能として設定するものとする)。*1
移行抑制機能を長期的に維持するための要求機能	長期機能維持特性	化学的安定性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
		変形追従性	透水係数	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
			厚さ	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。
液状化抵抗性	締固め度	○	○	—	長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあること。		
遮蔽機能	放射線の遮蔽性能	遮蔽性	密度	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。
			厚さ	○	○	—	被ばくを低減するために必要な遮蔽性能を有すること。

*1：分配係数は、材料仕様、施工の際に取得する分配係数データまたは代替指標となるデータにより管理する。

表 3.7-2 長期状態において覆土の透水特性に影響を及ぼす要因とその機構

設計項目	長期状態における影響要因			影響機構	要求性能 (技術要件)
透水係数	ベントナイト特性の変化	化学的影響	交換性陽イオンの変化	セメント系材料からの高カルシウム濃度の間隙水によるベントナイトのCa型化。	化学的安定性
			廃棄体中のほう酸塩、硫酸塩などの可溶性塩影響	可溶性塩影響により、空隙特性(空隙率、空隙構造)が変化するとともに、膨潤性能が低下。また、陥没による覆土の変形。	化学的安定性 変形追従性
	有効粘土密度*1の変化	力学的影響	金属の腐食	金属の腐食膨張により、覆の隅角部等に、厚さの減少および変位に伴う透水性が変化した領域の発生。	変形追従性
			地震影響	地震力により覆土の変形および液状化の発生。	変形追従性 液状化抵抗性
		化学的影響	モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、二次鉱物の生成	セメント系材料からの高アルカリ性の間隙水によるベントナイト構成材料の溶解に伴う密度低下。溶解成分と地下水成分などが反応して二次鉱物が沈殿。	化学的安定性
厚さ	短絡経路の形成	力学的影響	ガス発生	金属腐食等により発生するガスの破過が生じ、覆土に低密度部を形成。	変形追従性

*1：単位体積当たりに含まれるベントナイト分の乾燥重量をそれ自身の体積で割ることにより得られる密度であり、ベントナイト混合材料の特性を把握するときの指標のひとつ。

② 構造および仕様

難透水性覆土は、埋設設備の底面および埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。下部覆土は、難透水性覆土の外周部および埋設設備間狭隘部に設置する。上部覆土は、下部覆土の上部に設置する。

埋設設備間狭隘部とは、具体的には埋設設備の東西方向の間および埋設設備間の幅 2.5m 以下の南北方向の間を指す。

覆土の断面図を図 3.7-1 に示す。以下に各部位の概要、設計方針および仕様を示す。

a. 難透水性覆土

(a) 概要

難透水性覆土は、砂を母材としたベントナイト混合土で構成し、埋設設備の底面および埋設設備間狭隘部を除く外周部に設置する。

(b) 設計方針

難透水性覆土に求める安全機能は、移行抑制機能および遮蔽機能である。

移行抑制機能に対しては、透水特性を確保し、埋設設備からの流出水量を低減するために低透水性を考慮した設計とする。また、周辺岩盤に比して同程度以下の透水係数を長期的に維持できる設計とする。

遮蔽機能に対しては、遮蔽性能を確保する設計とする。

移行抑制機能を長期的に維持するための化学的安定性、変形追従性および液状化抵抗性は、長期状態評価において考慮する性能を満たす見通しがあるものとする。

(c) 仕様

▶ 透水特性

覆土の透水係数は、廃棄物埋設地の近傍に分布する岩盤(鷹架層)の透水係数が $1.1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 程度であることを踏まえ、岩盤(鷹架層)の透水係数以下を長期的に維持することを目標として設計する。

難透水性覆土は、化学的影響の要因である物質の供給源となるセメント系材料と隣接している。難透水性覆土の透水係数は、長期的に性能低下が生じることを想定し、施工時点において、空間的なばらつきを考慮しても全体として期待できる透水係数(以下「巨視的透水係数」という。)として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保する。また、埋設設備に内包される金属の腐食膨張および廃棄体に内包される可溶性塩の溶出による陥没に伴い鉛直方向に変形した場合でも低透水性を維持できるよう、難透水性覆土の

厚さは、埋設設備の表面から 2m 以上とする。

➤ 遮蔽性能

遮蔽性に配慮した設計として、公衆等の受ける線量を低減するような密度および厚さを確保するものとし、密度は $1,100\text{kg/m}^3$ 以上とする。

➤ 長期機能維持特性

・ 化学的安定性

化学的影響により覆土が変質した場合においても、長期的に低透水性を維持でき、化学的安定性の高いと考えられる天然の土質系材料を使用する。

・ 変形追従性

力学的影響または化学的影響により覆土が変形した場合においても、その変形に追従し、覆土全体として埋設設備からの流出水量の増加を抑制する設計とする。

・ 液状化抵抗性

力学的影響により覆土が変状することのないように、粒径分布に広がりを持った土質系材料で十分に締固めを行う。

なお、実際に使用する材料の粒径分布に基づいて、「道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説」 [6]に示される液状化判定法による確認を行う。

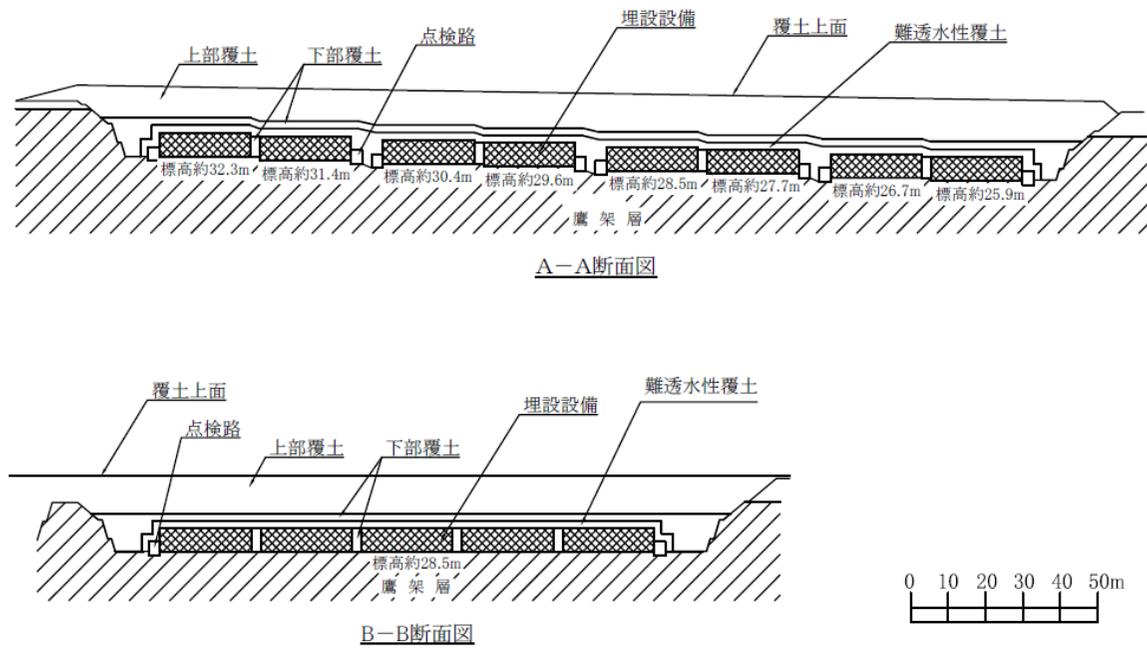
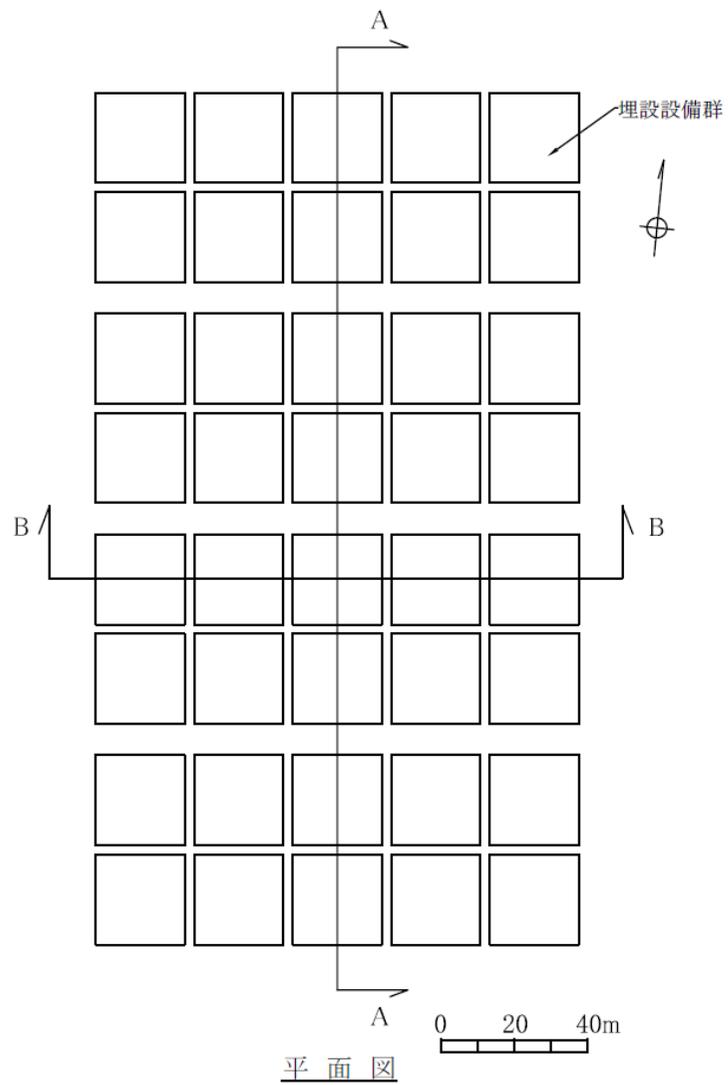


図 3.7-1 覆土の断面図

第4章 廃棄物埋設地の長期影響評価

4.1 概説

影響事象分析により覆土の長期評価にて特に考慮する必要がある事項を抽出し、それらについて具体的な評価を実施する。長期影響評価の一連の流れを図 4.1-1 に示す。



図 4.1-1 長期影響評価の一連の流れ

4.2 影響事象分析

廃止措置の開始後の評価に際しては、廃棄物埋設地の人工バリアおよび天然バリアの機能の状態の変化を十分に把握し、その変化を適切に評価に反映する必要がある。

人工バリアおよび天然バリアの機能に係る物理的・化学的状態の長期的な変化を予測し、長期的な廃棄物埋設地等の状態を設定する(状態設定)に当たって、廃棄物埋設地の設計において、安全機能のうち長期的な機能を期待する移行抑制機能に影響する可能性のある事象を体系的に分析した。

分析に当たっては、各部材相互の影響事象を熱、水理、力学および化学の観点で整理する。影響事象については、OECD/NEA [8] [9]、廃棄物安全小委員会 [10]および IAEA [11]で整理された FEP を参考に、網羅的・包括的に検討し、抽出・整理を行った。

4.2.1 各バリアに期待する性能

覆土完了後に期待する移行抑制機能は、放射性物質の移行する量を低減または遅延させる機能であり、この機能を期待できる性能としては、低溶出性、低拡散性、低透水性および収着性がある。これらのうち廃棄物埋設地の各バリアに期待する性能は低透水性と収着性とし、影響事象分析における前提条件とする。各バリアに期待する性能を表 4.2-1 および図 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 各バリアに期待する性能

バリア(部材)	性能	安全機能の内容
難透水性覆土、下部覆土*1	低透水性	ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土および下部覆土に対して低透水性を期待することにより、廃棄物埋設地の通過流量(埋設設備への浸入水量および埋設設備上部ならびに生活環境への地下水の流出)をできるだけ低下させる。また、比較的透水性の大きい覆土側への施設浸入地下水の流出割合を低減する。
岩盤(鷹架層)		岩盤(鷹架層)の低透水性によって、廃棄物埋設地への地下水浸入量の低減を期待するとともに、生活環境までの放射性物質の移行遅延を期待する。
セメント系材料(廃棄体の固型化材、埋設設備)	収着性	セメント系材料、難透水性覆土、上部覆土および岩盤(鷹架層)の収着性を期待することにより、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏出量を低減し、移行を遅延させる。 基本的に収着性が大きい方が移行抑制効果は大きいですが、土地(土壌)の利用が想定される場合は、収着性が小さい方が線量低減に寄与する場合もある。
難透水性覆土		
上部覆土		
岩盤(鷹架層)		

*1：下部覆土は土質系材料であり収着性を期待できるが、難透水性覆土または下部覆土の一方に収着性を期待することで十分であることから、保守側に下部覆土の収着性は考慮しない。

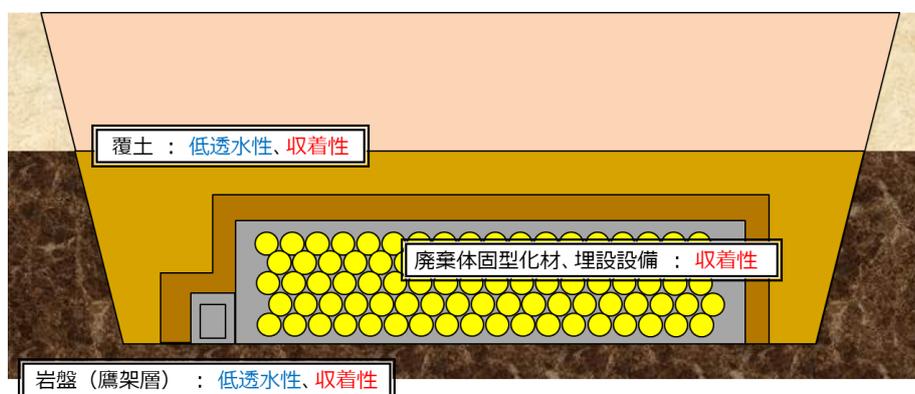


図 4.2-1 各バリアに期待する性能 (図示)

4.2.2 FEP の整理

廃止措置の開始後の評価における評価シナリオ選定においては、廃棄体、廃棄物埋設地および周囲の地質環境条件について網羅された FEP(Features, Events, Processes)からスクリーニング作業によって安全評価において考慮すべき影響事象を抽出する。

ピット処分である 1 号、2 号および 3 号廃棄物埋設地の FEP リストは、廃棄物埋設地の対象廃棄体、設備形状、浅地中処分地独自の特徴を考慮しつつ、以下の FEP を参考にピット処分の FEP リストを作成した。

- ① OECD/NEA の国際 FEP リスト [8] [9]
- ② 廃棄物安全小委員会報告書の FEP リスト [10]
- ③ IAEA-ISAM の FEP リスト [11]

作成したピット処分における FEP リストを表 4.2-2 に示した。本 FEP リストは、廃棄物安全小委員会報告書の FEP のうち、セメント系材料およびベントナイト系材料が用いられる人工バリア(緩衝材/埋め戻し材、プラグ・グラウト・支保工)の FEP を網羅したものとなっている。

なお、表 4.2-2 に示す FEP のうち、核種移行現象・特性(放射線分解を除く。)はバリア機能に直接影響するものではないため評価モデルの検討に際して考慮すること、施工不良については適切な品質管理が行われることから、影響事象より除外する。また、人間活動については生活環境の状態設定において考慮する。

4.2.3 影響事象分析の結果

実際の処分システムでは、外部事象および内部事象に関連する様々な事象が相互に関連しあっているが、設計・評価に当たって、全ての事象を考慮する必要は必ずしもなく、移行抑制機能に係る重要なものを適切に考慮すれば良い。重要な事象を選定する方法として、「4.2.1 各バリアに期待する性能」に示した各バリアに期待する性能に着目して考慮すべき事象の絞り込みを行った。

具体的には、熱(T)、水理(H)、力学(M)および化学(C)の観点からマトリクス形式の表を整理し、影響元となる部材(外部事象を含む。)の特性、そこで生じる事象やプロセスによって、対象とする各バリアに期待する性能に影響するか否かを分析した。分析の際には第 2 次 TRU レポートの FEP 辞書 [12]等を参考とした。

影響事象分析表を表 4.2-3～表 4.2-6 に示した。この分析の結果から、状態設定におい

て考慮すべき影響事象として、以下を抽出した。これらの事象については、廃棄物埋設地の状態設定において適切に考慮することとする。

a) 熱

- ・表 4.2-3 に示すとおり考慮すべき影響事象はない

b) 水理

- ・各部材の水理特性
- ・各部材の地下水流動(→地下水との反応)
- ・各部材の飽和(不飽和)(→地下水流動)
- ・液状化(覆土)
- ・隆起
- ・海水準変動
- ・気温、降水量、蒸発散量、かん養量、地下水位
- ・侵食

c) 力学

- ・各部材の力学特性
- ・各部材の応力
- ・廃棄体中の金属廃棄物および容器の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・上記の腐食に伴うガス発生(→応力、破壊とひび割れ、変形)
- ・各部材の破壊とひび割れ
- ・廃棄体、充填材、埋設設備、難透水性覆土および下部覆土の変形
- ・地震
- ・液状化(覆土)
- ・侵食

d) 化学

- ・各部材の化学特性
- ・各部材中の地下水化学
- ・各部材の地下水との反応
- ・各部材の化学的変質
- ・廃棄体中の金属廃棄物および容器の腐食(→地下水化学)

- ・埋設設備中の鉄筋の腐食(→地下水化学)
- ・廃棄体の固型化材、充填材、埋設設備の溶脱
- ・各部材中の有機物影響
- ・各部材中の微生物影響
- ・各部材中でのコロイド形成
- ・降下火砕物
- ・表流水・地下水の水質

なお、抽出した影響事象のうち、ガス発生の影響、地震による影響、液状化（覆土）の影響、コロイド影響、微生物影響のうちガス発生、微生物影響のうち金属腐食の促進および降下火砕物(化学)の影響については、設計を踏まえた影響評価を行った結果、影響を無視できると判断した。

表 4.2-2 ピット処分における FEP リスト

環境 分類	廃棄体層 (充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備 (底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層 (難透水性覆土、下部覆土*1)		覆土 (上部覆土)		母岩 (岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
熱的現象・特性	WT01	廃棄体層の熱特性	CT01	埋設設備の熱特性	BT01	ベントナイト混合土層の熱特性	XT01	覆土の熱特性	RT01	母岩の熱特性
	WT02	廃棄体の崩壊熱	CT03	セメント系材料の水和熱 埋設設備の温度	BT04	ベントナイト混合土層の温度 ベントナイト混合土層の熱膨張	XT04	覆土の温度	RT04	母岩の温度
	WT03	セメント系材料の水和熱					XT05	覆土の熱膨張	RT05	母岩の熱膨張
	WT04	廃棄体層の温度	CT04							
	WT05	廃棄体層の熱膨張	CT05							
水理学的現象・特性	WH01	廃棄体層の水理特性	CH01	埋設設備の水理特性	BH01	ベントナイト混合土層の水理特性	XH01	覆土の水理特性	RH01	母岩の水理特性
	WH02	廃棄体層の地下水流動	CH02	埋設設備の地下水流動	BH02	ベントナイト混合土層の地下水流動	XH02	覆土の地下水流動	RH02	母岩の地下水流動
	WH03	廃棄体層の飽和	CH03	埋設設備の飽和	BH03	ベントナイト混合土層の飽和	XH03	覆土の飽和	RH03	母岩の飽和
力学的現象・特性	WM01	廃棄体層の力学特性	CM01	埋設設備の力学特性	BM01	ベントナイト混合土層の力学特性	XM01	覆土の力学特性	RM01	母岩の力学特性
	WM02	廃棄体層の応力	CM02	埋設設備の応力	BM02	ベントナイト混合土層の応力	XM02	覆土の応力	RM02	母岩の応力
	WM03	廃棄体層の破壊とひび割れ	CM03	埋設設備の破壊とひび割れ	BM03	ベントナイト混合土層の破壊とひび割れ	XM03	覆土の破壊とひび割れ	RM03	母岩のクリープ
	WM04	廃棄体層の変形	CM04	埋設設備の変形	BM04	ベントナイト混合土層の変形	XM04	覆土の変形	RM04	EDZ の進展
化学的現象・特性	WC01	廃棄体層の化学特性	CC01	埋設設備の化学特性	BC01	ベントナイト混合土層の化学特性	XC01	覆土の化学特性	RC01	母岩の化学特性
	WC02	廃棄体層の地下水化学	CC02	埋設設備の地下水化学	BC02	ベントナイト混合土層の地下水化学	XC02	覆土の地下水化学	RC02	母岩の地下水化学
	WC03	廃棄体層の地下水との反応	CC03	埋設設備の地下水との反応	BC03	ベントナイト混合土層の地下水との反応	XC03	覆土の地下水との反応	RC03	母岩の地下水との反応
	WC04	廃棄体層の化学的変質	CC04	埋設設備の化学的変質	BC04	ベントナイト混合土層の化学的変質	XC04	覆土の化学的変質	RC04	母岩の化学的変質
	WC05	金属廃棄物、容器の腐食	CC05	鉄筋の腐食	BC07	ベントナイト混合土層の侵食性イオン影響	XC07	覆土の侵食性イオン影響	RC07	母岩の侵食性イオン影響
	WC06	充填材とコンクリートの溶脱	CC06	埋設設備の溶脱						
	WC07	廃棄体層の侵食性イオン影響	CC07	埋設設備の侵食性イオン影響	BC08	ベントナイト混合土層の微生物影響	XC08	覆土の微生物影響	RC08	母岩の微生物影響
	WC08	廃棄体層の微生物影響	CC08	埋設設備の微生物影響	BC09	ベントナイト混合土層の有機物影響	XC09	覆土の有機物影響	RC09	母岩の有機物影響
	WC09	廃棄体層の有機物影響	CC09	埋設設備の有機物影響	BC10	ベントナイト混合土層のコロイド形成	XC10	覆土のコロイド形成	RC10	母岩のコロイド形成
	WC10	廃棄体層のコロイド形成	CC10	埋設設備のコロイド形成	BC11	ベントナイト混合土層のガス発生影響	XC11	覆土のガス発生影響	RC11	母岩のガス発生影響
	WC11	廃棄体層のガス発生影響	CC11	埋設設備のガス発生影響						

環境 分類	廃棄体層 (充填材・ポーラスコンクリート層含む)		埋設設備 (底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		ベントナイト混合土層 (難透水性覆土、下部覆土*1)		覆土 (上部覆土)		母岩 (岩盤)	
	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP	ID	FEP
現象・放射線学的・特性	WR01	廃棄体層での核種の放射線崩壊	CR01	埋設設備での核種の放射線崩壊	BR01	ベントナイト混合土層での核種の放射線崩壊	XR01	覆土での核種の放射線崩壊	RR01	母岩での核種の放射線崩壊
	WR02	廃棄体層の地下水の放射線分解	CR02	埋設設備の地下水の放射線分解	BR02	ベントナイト混合土層の地下水の放射線分解	XR02	覆土の地下水の放射線分解	RR02	母岩の地下水の放射線分解
現象・核種移行・特性	WN01	廃棄体層の物質移動特性	CN01	埋設設備の物質移動特性	BN01	ベントナイト混合土層の物質移動特性	XN01	覆土の物質移動特性	RN01	母岩の物質移動特性
	WN02	廃棄体層の幾何形状・間隙構造	CN02	埋設設備の幾何形状・間隙構造	BN02	ベントナイト混合土層の幾何形状・間隙構造	XN02	覆土の幾何形状・間隙構造	RN02	母岩の幾何形状・間隙構造
	WN03	廃棄体層の核種移行	CN03	埋設設備の核種移行	BN03	ベントナイト混合土層の核種移行	XN03	覆土の核種移行	RN03	母岩の核種移行
	WN04	移流／分散	CN04	移流／分散	BN04	移流／分散	XN04	移流／分散	RN04	移流／分散
	WN05	拡散	CN05	拡散	BN05	拡散	XN05	拡散	RN05	拡散
	WN06	収着	CN06	収着	BN06	収着	XN06	収着	RN06	収着
	WN07	沈殿溶解	CN07	沈殿溶解	BN07	沈殿溶解	XN07	沈殿溶解	RN07	沈殿溶解
	WN08	コロイド移行	CN08	コロイド移行	BN08	コロイド移行	XN08	コロイド移行	RN08	コロイド移行
	WN09	ガスによる移行	CN09	ガスによる移行	BN09	ガスによる移行	XN09	ガスによる移行	RN09	ガスによる移行
					BN10		XN10	臨界	RN10	臨界
施工不良	WQ01	廃棄体層の製作・施工不良	CQ01	コンクリートの製作・施工不良	BQ01	ベントナイト混合土層の製作・施工不良	XQ01	覆土の製作・施工不良	RQ01	調査用ボーリング孔のシール不良

*1：下部覆土にベントナイト混合土を用いない場合は覆土として取り扱う

表 4.2-3 影響事象分析表（熱（T））

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)		
熱	廃棄体		<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04,CC04)が生じる温度(約60℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(WC04)が生じる温度(約80℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(WC04)が生じる温度(約80℃)よりも十分小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、上部覆土の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、上部覆土の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、岩盤の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体に含まれる放射性物質の崩壊熱(WT02)は、埋設対象の廃棄体に含まれる放射性物質の量が少なく、廃棄体層の温度(WT04)は、その熱特性(WT01)を踏まえると、岩盤の温度変化が生じる温度とはならないため、影響は生じない。 		
			<ul style="list-style-type: none"> 廃棄体は発電所で製作されるため固型化時の水和熱(WT03)の影響は生じない。 								
		充填材	<ul style="list-style-type: none"> 充填材の充填時に水和熱(WT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(WT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に難透水性覆土および下部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に難透水性覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(WT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 		
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート構築時に水和熱(CT03)が発生するが、放射性物質の移行は水和熱(CT03)が低下した後に生じること、安全機能は水和後のセメント系材料の特性に期待しているため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に難透水性覆土および下部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に難透水性覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)が低下した後に上部覆土を施工するため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 建設時のセメント系材料の水和熱(CT03)の影響は、コンクリートの極近傍に限定されるため、影響は無視できる。 			
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 発熱しないので、熱特性(BT01)、温度(BT04)、熱膨張(BT05)を考慮する必要はない。 									
	上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 発熱しないので、熱特性(XT01)、温度(XT04)、熱膨張(XT05)を考慮する必要はない。 									
岩盤・地下水	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、セメント系材料の熱による化学的変質(WC04,CC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(BC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、ベントナイト系材料の熱による化学的変質(BC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、上部覆土の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、上部覆土の熱による化学的変質(XC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の温度(RT04)(地温・水温)の変動範囲は、岩盤の熱による化学的変質(RC04)が生じる温度ではなく、発熱もしないため、影響は生じない。 				
自然事象	火砕物密度流(NP02)	<ul style="list-style-type: none"> 火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。 									

表 4.2-4 影響事象分析表 (水理 (H)) ※1

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
水理	廃棄体	充填材	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、埋設設備内の水理特性および化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、難透水性覆土および下部覆土内の水理特性および化学特性に関係し、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、難透水性覆土内の水理特性および化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、覆土内の水理特性および化学特性に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、覆土内の水理特性および化学特性に関係し、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・廃棄体および充填材の水理特性 (WH01)、地下水流動 (WH02)、飽和/不飽和 (WH03) は、岩盤内の水理、化学特性に関係し、岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	
	埋設設備 (底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はコンクリートの番号に対応)
	難透水性覆土、下部覆土	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) はベントナイト混合土層の番号に対応)	
	上部覆土	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	・同上 (ただし、部位名称 (ID) は覆土の番号に対応)	
	岩盤・地下水 (地下水流、水理特性)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、埋設設備内の水理特性および化学特性に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、難透水性覆土および下部覆土内の水理特性および化学特性に関係し、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、難透水性覆土内の水理特性および化学特性に関係し、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、上部覆土内の水理特性および化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、上部覆土内の水理特性および化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、自身の水理特性および化学特性に関係し、低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・岩盤の水理特性 (RH01)、地下水流動 (RH02)、飽和/不飽和 (RH03) は、自身の水理特性および化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)		
	火砕物密度流 (NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。								
	断層活動 (変形) (NP01)	・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定されるため、水理的な影響は生じない。								
	地震 (NP01)	・地震動による地下水流動 (WH02, CH02, BH02, XH02, RH02) の変化は一時的であり、水理的な影響は生じない。								
	液状化 (覆土) (NP01)	・液状化 (覆土) の発生により、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・液状化 (覆土) の発生により、難透水性覆土および下部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、難透水性覆土および下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化 (覆土) の発生により、地下水流動 (BH02) に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・液状化 (覆土) の発生により、上部覆土内の間隙水圧が一時的に変化するなど、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化 (覆土) の発生により、地下水流動 (XH02) に変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)	・N値50以上の岩盤であるため、影響は生じない。			

※1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
水理	自然事象	隆起 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 隆起および海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) が変化する。セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、難透水性覆土および下部覆土内の地下水流動 (BH02) が変化する。難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) が変化する。上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 海水準変動により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) が変化する。岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
		海水準変動 (NP04)							
		気温、降水量・蒸発散量、かん養量、地下水水位 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量およびかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場および地下水位が変化する。埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化する。セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量およびかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場および地下水位が変化する。難透水性覆土および下部覆土内の地下水流動 (BH02) も変化する。難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量およびかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場および地下水位が変化する。上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化する。上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 気候変動により地盤へのかん養量が増加しても、岩盤の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 気温、降水量、蒸発散量およびかん養量の変化により、廃棄物埋設地周辺の地下水流動場および地下水位が変化する。廃棄物埋設地近傍の岩盤の地下水流動 (RH02) も変化する。岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
		侵食 (NP03)	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには埋設設備が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動場が大きく変化し、埋設設備内の地下水流動 (WH02, CH02) も変化する。セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには難透水性覆土および下部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動場が大きく変化し、難透水性覆土および下部覆土の地下水流動 (BH02) も変化する。難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により、廃棄物埋設地周辺の地形が変化、さらには上部覆土が削剥されることにより、廃棄物埋設地の地下水流動場が大きく変化し、上部覆土の地下水流動 (XH02) も変化する。上部覆土の透水性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える) 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化した場合においても、廃棄物埋設地近傍の岩盤の低透水性に影響は生じない。ただし、岩盤が侵食されることにより、移行距離が短くなることは考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食により廃棄物埋設地周辺の地形が変化し、廃棄物埋設地の地下水流動場が大きく変化し、岩盤の地下水流動 (RH02) も変化する。岩盤の収着性に影響する可能性がある。 (→化学：地下水との反応)
		風化 (NP04)	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響を受けるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、難透水性覆土および下部覆土が風化の影響を受けるのは、将来数万年後の地表に近接時であるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の浅い部分が物理的・化学的風化により、地化学環境が変化し、水理特性 (XH01)、地下水流動 (XH02) が変化する可能性があるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の水理的影響に包含されるため、影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 風化の伸展は緩慢であり、埋設設備が風化の影響を受けるのは、将来数万年後の地表に近接時で、設置岩盤は更に深い位置にあるため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
		生物化学的現象 (SE03)	<ul style="list-style-type: none"> 埋設設備まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土表面は、樹木に覆われて樹木の根 (SE03) が上部覆土内に伸長することが推定されるが、その長さは 3m 程度で浅く、地下水水位との関係から、地下水水位深における上部覆土の透水性への影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤まで樹木の根 (SE03) は到達しないため、水理的な影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 同左
		津波 (隕石落下)	<ul style="list-style-type: none"> 巨大津波に伴う地下水流動への影響は一時的なものであり、水理的な影響は無視できる。 						
透水性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 各項目参照 								

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

表 4.2-5 影響事象分析表（力学（M））※1

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
力学	廃棄体	充填材	<ul style="list-style-type: none"> 金属廃棄物および容器の腐食(WC05)膨張およびガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、廃棄体領域の力学特性(WM01)を考慮すると、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 金属廃棄物および容器の腐食(WC05)膨張およびガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、難透水性覆土および下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属廃棄物および容器の腐食(WC05)膨張およびガス発生(WC11)によって生じる応力(WM02)によって、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。 		<ul style="list-style-type: none"> 安定な岩盤に設置されることから、廃棄体層の力学特性(WM01)、応力(WM02)、破壊とひび割れ(WM03)、変形(WM04)による影響は無視できる。 	
	埋設設備(底版、外周仕切設備、内部仕切設備、覆い)		<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食(CC05)膨張およびガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食(CC05)膨張およびガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、難透水性覆土および下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)が生じることで、密度低下が生じ、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の腐食(CC05)膨張およびガス発生(CC11)によって生じる応力(CM02)によって、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)が生じる可能性があり、難透水性覆土の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 埋設設備の上部に設置され、十分な厚さがあることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 安定な岩盤に設置されることから、コンクリートの力学特性(CM01)、応力(CM02)、破壊とひび割れ(CM03)、変形(CM04)による影響は無視できる。 		
	難透水性覆土、下部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、埋設設備内の水理特性、化学特性が変化することで、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の低透水性に影響するものである。 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土の上部に設置され、十分な厚さがあることから、難透水性覆土および下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 安定な岩盤に設置されることから、難透水性覆土および下部覆土の力学特性(BM01)、応力(BM02)、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)による影響は無視できる。 			
	上部覆土	<ul style="list-style-type: none"> 難透水性覆土および下部覆土は、地下水により飽和し膨潤することによる応力(BM02)が発生するが、周辺の地圧等と比較してその膨潤圧は小さいため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の力学特性(XM01)および応力(XM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の上載圧(応力(XM02))による難透水性覆土および下部覆土の圧密沈下による変形(BM04)が生じる可能性があるが、透水係数が小さくなる方向であり、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の力学特性(XM01)および応力(XM02)の状態から、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の低透水性に影響するものである。 	<ul style="list-style-type: none"> 上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)は、自身の水理特性、化学特性が変化することで、収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	<ul style="list-style-type: none"> 安定な岩盤に設置されることから、上部覆土の力学特性(XM01)、応力(XM02)、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)による影響は無視できる。 	
	岩盤・地下水(地圧・水圧)	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)および応力(RM02)の状態から、セメント系材料の収着性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)および応力(RM02)の状態から、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)および応力(RM02)の状態から、難透水性覆土の収着性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)および応力(RM02)の状態から、上部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)および応力(RM02)の状態から、上部覆土の収着性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の低透水性に影響するものである。 	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の力学特性(RM01)、応力(RM02)、破壊とひび割れ(RM03)、変形(RM04)は、自身の水理特性、化学特性に関係し、収着性に影響する可能性がある。 (→水理：地下水流動、→化学：地下水との反応) 	
				<ul style="list-style-type: none"> 掘削時の岩盤の応力(RM02)開放によって岩盤のEDZが進展し、流出(BM05)が生じる可能性があるが、応力開放は小さくEDZの進展は生じないため、影響は生じない。 					

※1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

影響元		影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)
力学 自然 事象	降下火砕物 (NP02)	・覆土上に降下火砕物が堆積する可能性があるが、その層厚は2m以下と推定されるため、影響は生じない。							
	火砕物密度流 (NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。							
	断層活動(変形) (NP01)	・断層活動による変形は、出戸西方断層の活動による地盤の傾斜を想定しているが、同断層の規模や平均変位速度を考慮した地表変位を仮定した場合でも、廃棄物埋設地における地盤傾斜は0.1%未満と推定され、傾斜にともなう応							
	地震(NP01)	・地震によって埋設設備内が変形(CM04)・損傷しても、埋設設備の収着性への影響は生じない。	・地震によって、難透水性覆土および下部覆土に応力(BM02)が発生し、破壊とひび割れ(BM03)、変形(BM04)することによって、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって難透水性覆土および下部覆土が変形(BM04)しても、難透水性覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、上部覆土に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、上部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって上部覆土が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。	・地震によって、岩盤に応力(XM02)が発生し、破壊とひび割れ(XM03)、変形(XM04)することによって、岩盤の低透水性に影響する可能性がある。	・地震によって岩盤が変形(BM04)・損傷しても、上部覆土の収着性への影響は生じない。	
	液状化(覆土) (NP01)	・液状化(覆土)の発生により、埋設設備内の地下水流動(WH02, CH02)に変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 (→化学:地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土および下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、難透水性覆土および下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、難透水性覆土および下部覆土内の地下水流動(BH02)に変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学:地下水との反応)	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土の密度、間隙率等に変化が生じ、下部覆土の透水性に影響が生じる可能性がある。	・液状化(覆土)の発生により、下部覆土内の地下水流動(XH02)に変化が生じ、下部覆土の収着性に影響する可能性がある。 (→化学:地下水との反応)	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。	・N値50以上の岩盤であるため、液状化(覆土)の発生は考え難く、影響は生じない。	
	侵食(NP03)	・コンクリートが侵食され、喪失した場合は、セメント系材料の全ての機能に影響する可能性がある。	・難透水性覆土および下部覆土が侵食され、喪失した場合は、難透水性覆土および下部覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・上部覆土が侵食され、喪失した場合は、覆土の全ての機能に影響する可能性がある。	・岩盤が侵食され、喪失した場合は、岩盤の全ての機能に影響する可能性がある。				
風化(NP04)	・風化によって上部覆土および岩盤の空隙構造等が変化することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の力学的影響に包含されるため、影響は無視できる。								

*1: 各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

影響元	影響先	固型化材、充填材、埋設設備 (収着性)	難透水性覆土、下部覆土 (低透水性)	難透水性覆土 (収着性)	上部覆土 (透水性)	上部覆土 (収着性)	岩盤 (低透水性)	岩盤 (収着性)	
化学	岩盤・地下水	・岩盤の化学特性(RC01)および地下水の液性(地下水化学(RC02))がセメント系材料の化学的な反応(地下水との反応(WC03)、化学的変質(WC04)、溶脱(WC06))に関係し、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。	・岩盤の化学特性(RC01)および地下水の液性(地下水化学(RC02))が難透水性覆土および下部覆土の化学的な反応(地下水との反応(BC03)、化学的変質(BC04))に関係し、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)および地下水の液性(地下水化学(RC02))が上部覆土の化学的な反応(地下水との反応(XC03)、化学的変質(XC04))に関係し、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)	・岩盤の化学特性(RC01)および地下水の液性(地下水化学(RC02))が自身の化学的な反応(地下水との反応(RC03)、化学的変質(RC04))に関係し、低透水性に影響する可能性がある。	・同左 (ただし、低透水性を収着性に置き換える)	
	各部材共通	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(WC08, CC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進、放射性物質の化学特性の変化が生じ、セメント系材料の収着性に影響する可能性がある。 ・間隙水中でコロイド形成(WC10, CC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性はあるが、その他の化学的影響に包含されるため、難透水性覆土および下部覆土の低透水性への影響は無視できる。 ・間隙水中でのコロイド形成(BC10)は、難透水性覆土および下部覆土の低透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(BC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、難透水性覆土の収着性に影響する可能性がある。 ・間隙水中でコロイド形成(BC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性はあるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。 ・間隙水中でのコロイド形成(XC10)は、上部覆土の透水性に影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(XC08))によって、有機物の分解、放射性物質の化学特性の変化が生じ、上部覆土の収着性に影響する可能性がある。 ・間隙水中でコロイド形成(XC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着すること等により、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・微生物の活動(微生物影響(RC08))によって、有機物の分解、金属の腐食促進の可能性はあるが、その他の化学的影響に包含されるため、上部覆土の低透水性への影響は無視できる。 ・間隙水中でのコロイド形成(RC10)は、低透水性に影響は生じない。 ・間隙水中でコロイド形成(RC10)が生じる場合には、コロイドに放射性物質が吸着することにより、移行特性(見掛け上の収着性)に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水(間隙水)の放射線分解(WR02, CR02, BR02, XR02, RR02)によって、ガスが発生する可能性はあるが、廃棄体の放射線量は小さく、影響は無視できる。 	
自然事象	降下火砕物 (NP02)	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。	・降下火砕物は、上部覆土は、降下火砕物の溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・降下火砕物は、上部覆土は、降下火砕物の溶出成分により化学的変質(XC04)が生じ、上部覆土の透水性に影響する可能性がある。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。	・降下火砕物による地下水の水質の変化が考えられるが、影響期間は短期であり、範囲が限定されるため、影響は無視できる。	
	火砕物密度流 (NP02)	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	・火砕物密度流は周辺の火山の活動履歴より、当該事象が生じる可能性があるのは1万年以降であるため考慮しない。	
	表流水・地下水の水質 (NP02)	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・地下水の水質は「岩盤・地下水」参照 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 ・酸性雨は、地下に浸透する間に蒸発散・地表流出、土壌による緩衝等を受け、問題とならない水質(現状観測される地下水と同程度)となるため、影響は生じない。 	
	風化 (NP02)	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・風化によって上部覆土および岩盤の鉱物の変質することが考えられるが、風化の進展はごくわずかであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。
	生物学的現象	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。	・「微生物影響」参照。
津波(隕石落下)	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	・巨大津波によって、海水が廃棄物埋設地に流入することで、間隙水の液性(地下水化学(MC02, CC02, BC02, XC02, RC02))に変化が生じるが、一時的なものであり、その他の化学的影響に包含されるため、影響は無視できる。	

*1：各バリア機能への直接的な影響は黄緑色、間接的な影響は薄黄緑色で識別

4.3 力学的影響評価

4.3.1 影響事象の概要

廃棄物埋設地の状態設定のうち、状態変化の評価(力学的影響)に係る現象を整理する。

現象の整理に当たっては、覆土の設計要件である低透水性(透水係数および厚さ)に影響を与える現象を対象に行う。覆土の透水係数および厚さへの力学的影響は、覆土自身の変形やそれに伴う密度変化により生じる。覆土の変形は、隣接する埋設設備の変形に支配されることから、埋設設備に生じる現象を対象とする。

埋設設備に生じる現象は、埋設設備の膨張変形および陥没変形を想定する。そのため、埋設設備の膨張および陥没に分類して現象の整理を行う。

(1) 膨張現象

埋設設備および充填固化体には、金属が含まれており、金属周辺の環境条件に依存した電気化学的腐食により金属が腐食し腐食生成物が生成されることで、金属の膨張が生じると想定する。

また、均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、可溶性塩と埋設設備中のセメント系材料の反応に伴い膨張性鉱物が生成するため、埋設設備が膨張することを想定する。

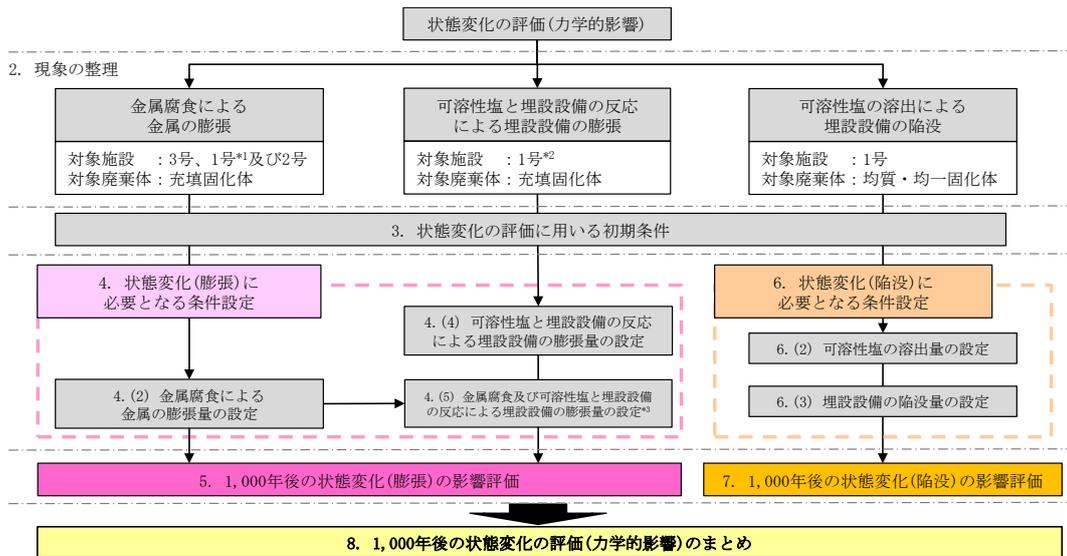
(2) 陥没現象

均質・均一固化体には、可溶性塩が含まれており、埋設設備に浸入した地下水との反応により溶出し、空隙が生じることおよび廃棄体に上部空隙が存在することから、埋設設備に空洞が発生し、陥没現象 [13]が生じると想定する。

4.3.2 検討手順

状態変化の評価(力学的影響)は、廃棄物埋設地ごとで生じる現象が複数存在するため、前項における現象の整理結果を踏まえて、覆土への力学的影響の評価に係る検討手順を体系的に整理する。状態変化の評価(力学的影響)の検討手順を図 4.3-1 に示す。

なお、検討手順のうち「1,000年後の状態変化(膨張、陥没)」について詳述し、前段の条件設定に関する事項については本論文では割愛する。



*1 : 1号7群の埋設設備4基および8群の埋設設備5基が対象となる。

*2 : 1号1群から6群までの埋設設備30基および7群の埋設設備1基が対象となる。

*3 : 金属の膨張量を加味し評価する。

図 4.3-1 状態変化の評価(力学的影響)の検討手順

4.3.3 1,000年後の状態変化(膨張)の影響評価

(1) 力学的影響評価の考え方

金属腐食および可溶性塩と埋設設備の反応による膨張量は、3号廃棄物埋設地で最大となり、最も可能性が高い設定で水平方向：0.35m(東西)、鉛直方向：0.0364m、最も厳しい設定で水平方向：5.0m(東西)、鉛直方向：0.52mである(第45表および第46表参照)。最も可能性が高い設定および最も厳しい設定の膨張量が直接的に覆土の変位量になると仮定した場合、覆土の形状変化は図4.3-2 c.および図4.3-2 d.に示すとおりとなる。

覆土完了後の廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数m以上あることから、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である(図4.3-2 a.参照)。金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において、メートルオーダーの大変形として生じることとなる。埋設設備間の狭隘部に設置された下部覆土は、埋設設備の膨張に伴い、埋設設備に挟まれ圧縮された状態となり圧密(密度増加)することから、覆土の低透水性への影響はないと想定される。また、狭隘部は隣接する埋設設備により変形が拘束されることから、側部岩盤側の覆土方向へ変形が卓越すると想定される(図4.3-2 b.参照)。そのため、大きな剛性を持つ金属が変形することにより、金属と比較して小さな剛性を持つ側部岩盤側の覆土が、強制変位のような状態でせん断変形する状態である。

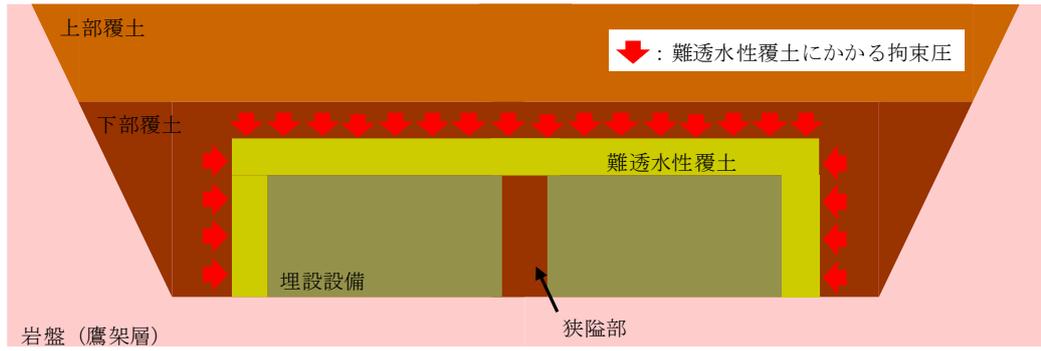
以上のことから、膨張による変形が卓越する隅角部(側部岩盤方向)の難透水性覆土に着目し、力学的影響を評価する。

最も可能性が高い設定における水平方向の変形量 0.35m が難透水性覆土の厚さ 2.0m 以下であることから、難透水性覆土に 20%程度のひずみが生じるものの開口は生じない(図 4.3-2 c.参照)。しかしながら、せん断面付近のひずみの発生に伴い、透水性能の低下が生じる可能性がある。難透水性覆土(購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土)のせん断変形を対象とした三軸圧縮試験結果およびせん断透水試験結果を図 4.3-3 に示す。図 4.3-3 a.より、せん断ひずみ 5%以降から 30%までせん断破壊後の残留状態^{*1}であることを確認できる。残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示すため、20%程度のひずみが生じる難透水性覆土の隅角部においても、同じ性質を示すと考えられる。また、図 4.3-3 b.より、残留状態であるせん断ひずみ 15%までの変形において透水係数に大きな変化が生じていない。これらのことから、難透水性覆土には 20%程度のひずみが生じるが、せん断面付近の透水性能の低下が生じないと考えられる。

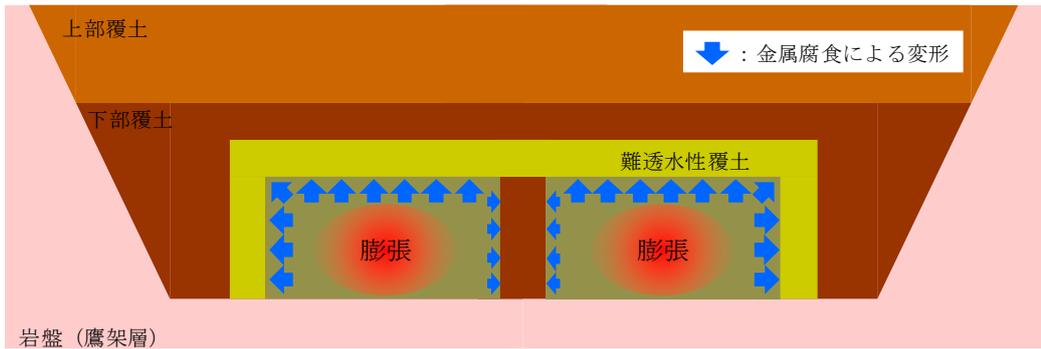
最も厳しい設定における水平方向の変形量 5.0m が難透水性覆土の厚さ 2.0m 以上であることから、難透水性覆土に開口が生じる可能性がある(図 4.3-2 d.参照)。地盤内の複雑な応力状態および変形挙動を考慮し、開口の可能性について詳細に検討する必要がある。

以上のことから、最も厳しい設定に対し、廃棄物埋設地の規模を考慮した覆土の低透水性(透水係数および厚さ)への力学的影響評価を実施する。また、最も可能性が高い設定においては難透水性覆土に開口は生じないものの、覆土の低透水性(厚さの変化)を確認するため、力学的影響評価を同様に実施する。

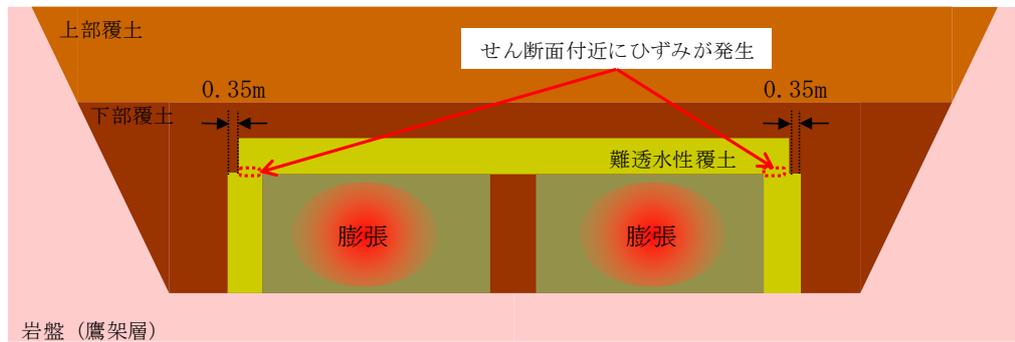
*1：残留状態とは、せん断抵抗がピーク値(せん断強さ)を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達した状態である。



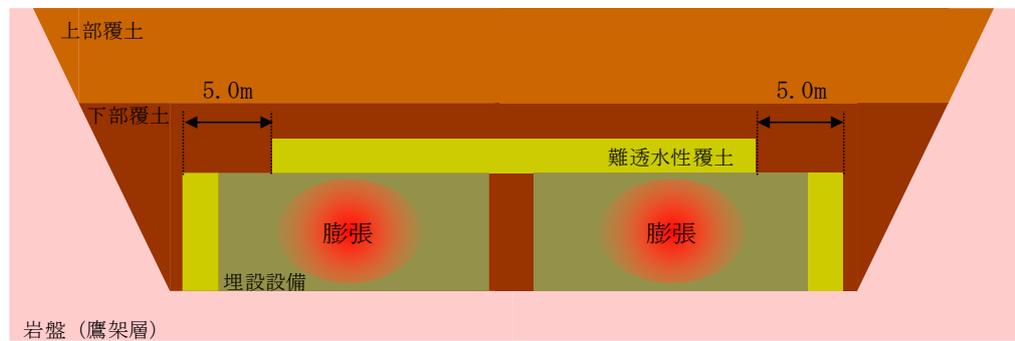
a. 初期状態(覆土完了後)



b. 金属腐食による変形

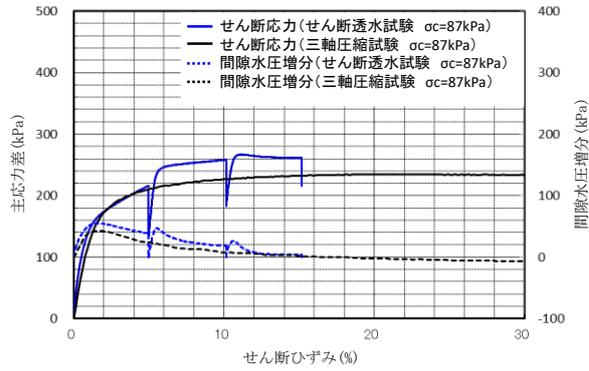


c. 最も可能性が高い設定における覆土の形状変化

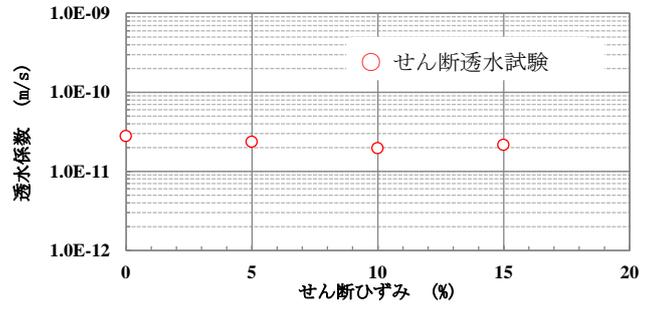


d. 最も厳しい設定における覆土の形状変化

図 4.3-2 埋設設備の膨張に伴う覆土の形状変化の概念図



a. 主応力差-せん断ひずみ



b. 透水係数-せん断ひずみ

図 4.3-3 三軸圧縮試験およびせん断透水試験による試験結果

(2) 力学的影響評価手法

力学的影響評価手法は、廃棄物埋設地の規模を考慮し、数値解析を用いた評価を実施する。

地盤工学の数値解析分野では、有限要素法(Finite Element Method)(以下「FEM」という。)が広く用いられている。文献 [14] [15]によると、FEM は計算格子を用いた計算手法であることから、地震時における地盤の安定性評価などの微小変形である数%程度までのひずみを対象として用いられている。数%のひずみを超える大変形においては、変形するにつれ要素に大きなひずみが生じ、計算精度を低下させる可能性がある。

大変形を扱うことができる解析手法の 1 つとして、個別要素法(Distinct Element Method)(以下「DEM」という。)がある。文献 [14]～ [16]によると、DEM は対象物を粒子の集合体(剛体)とし、粒子に運動方程式を適用することで、不連続体の挙動を再現する解析手法である。

上記の文献 [14]～ [16]より、解析手法とひずみレベルは図 4.3-4 に示す関係があると整理される。

廃棄物埋設地の覆土に生じるひずみは、金属腐食および可溶性塩と埋設設備の反応による膨張により、数十～数百%に及ぶことが予想される。大変形の領域においては、分離、すべりおよび剥離のような不連続体としての挙動が顕著になることから、不連続体を対象とした解析として DEM により評価することが好ましい。

以上のことから、埋設設備の膨張によるメートルオーダーの大変形においては、不連続体を対象とした DEM 解析手法を採用する。

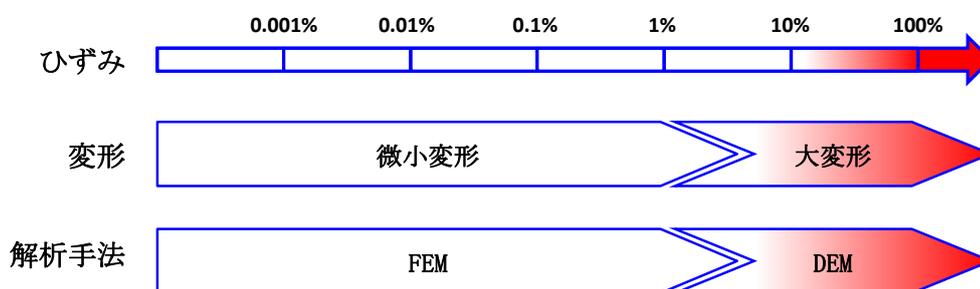


図 4.3-4 解析手法とひずみレベルの関係

(3) 覆土の主な仕様

廃棄物埋設地における覆土の主な仕様を表 4.3-1 に示す。難透水性覆土の材料はベントナイト混合土、下部覆土の材料は現地発生土に必要なに応じてベントナイト、砕砂および砕石、上部覆土の材料は現地発生土に必要なに応じて砕砂および砕石を混合する。

表 4.3-1 覆土の主な仕様

設備	主要な部位	仕様	
		材料	性能
覆土	難透水性覆土	・ ベントナイト混合土	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点):巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下 ・ 厚さ:2m 以上
	下部覆土	・ 現地発生土に必要なに応じてベントナイト、砕砂および砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点):巨視的透水係数*1として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下 ・ 厚さ:難透水性覆土側部および難透水性覆土上面から層厚 2m 以上
	上部覆土	・ 現地発生土に必要なに応じて砕砂および砕石を混合	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透水係数(施工時点):廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度 ・ 厚さ:下部覆土上面から現造成面またはそれ以上

*1:空間的なばらつきを考慮しても全体系として期待できる透水係数を指す。

(4) 解析に用いる諸条件の設定

④ 解析モデル

解析モデルの設定においては、膨張量の最も大きい廃棄物埋設地の断面を対象とする。金属廃棄体の配列数が多い水平方向に変形が卓越することから、隅角部付近の覆土に大きなひずみが発生する。そのため、解析対象断面は、3号廃棄物埋設地の東西方向の断面とし、埋設設備端部の1区画を対象とする。解析対象断面の位置図を図 4.3-5 に、解析モデルを図 4.3-6 にそれぞれ示す。

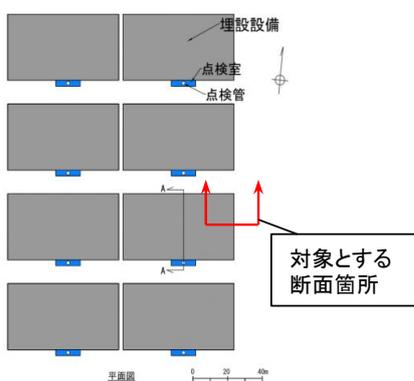


図 4.3-5 3号廃棄物埋設地における解析対象断面の位置図

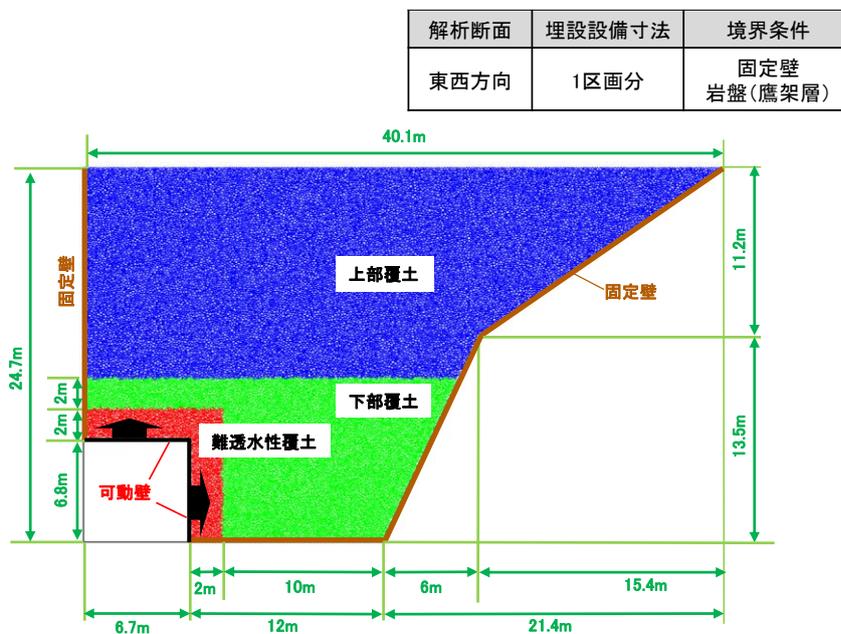


図 4.3-6 3号廃棄物埋設地の解析モデル

⑤ 埋設設備の膨張影響の方向

覆土の力学的影響(膨張影響)は、埋設設備中の金属腐食および可溶性塩と埋設設備の反応に起因し生じるが、その変形方向に関しては、これらの現象に起因する覆土への応力分布を定量的に把握することが困難であるため、変形方向の状態を設定する。埋設設備の膨張影響の方向の設定を表 4.3-2 に示す。

表 4.3-2 埋設設備の膨張影響の方向の設定

設定	設定の考え方	変形概念図
<p>【最も可能性が高い設定／最も厳しい設定共通】</p> <p>鉛直方向へ卓越した変形</p>	<p>埋設設備の変形は、埋設設備の側部に必要に応じて碎石を混合した剛性の高い下部覆土を設置することから、鉛直方向に卓越して生じる可能性が高いと考えられる。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、全て鉛直方向へ作用するとして設定する。</p>	
<p>【最も可能性が高い設定／最も厳しい設定共通】</p> <p>鉛直・水平方向への変形</p>	<p>埋設設備の変形は、構造上躯体が水平方向に大きいことから、水平方向に変位が生じる可能性がある。</p> <p>そのため、埋設設備の膨張に伴う変位は、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして設定する。</p>	

⑥ 解析に用いる変形量

埋設設備中の金属廃棄物は、廃棄体 1 本ごとの金属重量が異なる。そのため、金属腐食に伴う膨張現象が埋設設備の区画ごとで不均質に生じることが予想される。

覆土の力学的影響は、膨張現象に起因した変形挙動による不均質性に対し、以下の観点を踏まえた最大の値となる変形量を設定することで、不確実性を包含した評価を行う。

b. 鉛直方向へ卓越した変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直方向への膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直方向の変形量は、区画ごとにそれぞれが膨張した場合に比較して、1つの区画のみが膨張した場合において、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、全て鉛直方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

c. 鉛直・水平方向への変形

埋設される金属廃棄物の量が埋設設備の区画ごとに異なることから、鉛直・水平方向の膨張は、埋設設備の区画ごとに異なる挙動を示す。一方で、埋設設備の鉛直・水平方向に対する変形量は、埋設設備の区画ごとに生じる膨張量の合計であるため、鉛直方向に比較して水平方向への膨張が卓越し、最大となる。そのため、埋設設備に生じる膨張に伴う変形は、埋設設備端部の 1 区画に対して、埋設設備の構造寸法に基づくアスペクト比が維持されたまま鉛直・水平方向へ作用するとして、最大の値を設定する。

以上のことから、解析に用いる変形量は、覆土の低透水性への影響評価の観点から、隅角部付近の覆土に大きなひずみが生じるよう最大の値を設定する。また、解析の変形挙動は、「4.3.3(4) ⑤埋設設備の膨張影響の方向」に従い埋設設備の変形比率を保ったまま一定として変形するものとする。解析に用いる変形量を以下の表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 DEM 解析に用いる変形量

変形方向	変形量(m/基)	
	東西方向	鉛直方向
鉛直方向へ卓越した変形	0.0	2.0
鉛直・水平方向への変形	5.0	1.0

⑦ 解析用物性値

廃棄物埋設地における力学的影響評価に必要となる解析用物性値を設定する。土質系材料である覆土の変形挙動を再現するため、覆土の材料を用いた供試体による三軸圧縮試験結果に対して、シミュレーション解析により各覆土の物性値のフィッティングを行う。フィッティングが完了した時点の各種物性値を、廃棄物埋設地における力学的影響評価の解析用物性値とする。三軸圧縮試験、三軸圧縮試験の供試体、シミュレーション解析およびフィッティングの具体的な内容を以下に示す。また、シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値に対し、廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性を示す。

d. 三軸圧縮試験

(a) 試験の選定理由

廃棄物埋設地および三軸圧縮試験の応力状態の関係を図 4.3-7 に示す。

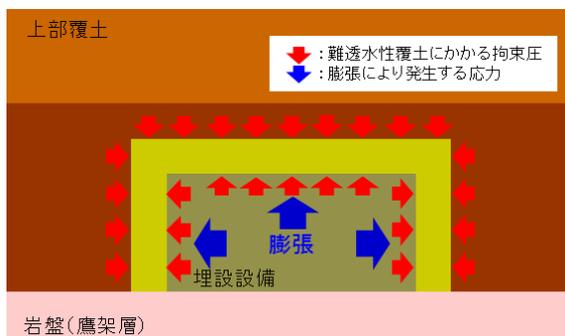
廃棄物埋設地は、覆土による拘束圧が作用することで、覆土内部の応力状態が等方応力状態にある。その後、長期的な埋設設備の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられる。そのため、埋設設備の膨張時において、覆土内部では圧縮応力およびせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。

文献⁽³⁸⁾によると、三軸圧縮試験は、等方応力状態で圧密された土に対して、軸圧縮されるとき強度・変形特性および主応力差最大時の有効応力を求めることができる。そのため、廃棄物埋設地における長期的な埋設設備の膨張時の圧縮応力およびせん断応力が作用している状態と同様であると考えられる。

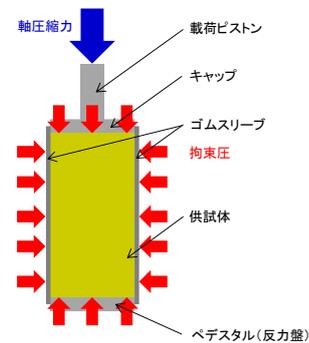
以上のことから、埋設設備の膨張時における覆土の変形挙動を三軸圧縮試験により再現できると判断し、三軸圧縮試験を選定した。

(b) 試験方法

三軸圧縮試験は、地盤工学会基準「土の圧密非排水(c \bar{U})三軸圧縮試験」(JGS 0523-2009)に準拠し実施する。三軸圧縮試験における拘束圧は、各覆土にかかる上載圧相当を包含している。軸圧縮は、ひずみ速度が一定になるように連続的に供試体を圧縮する。また、圧縮中は、軸圧縮力および軸変位量を測定することで主応力差-軸ひずみ曲線を取得する。



a. 廃棄物埋設地の応力状態



b. 三軸圧縮試験の応力状態

図 4.3-7 廃棄物埋設地および三軸圧縮試験の応力状態の関係

e. 三軸圧縮試験の供試体

(a) 難透水性覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた難透水性覆土の供試体は、購入砂を母材とした Ca 型ベントナイト混合土である。

難透水性覆土の材料である購入砂は、JIS A 5005⁽³⁷⁾に準拠した製品を用いるため、品質(密度および粒度分布)に有意なばらつきがない。また、難透水性覆土の材料であるベントナイトは細粒分である粘土に分類され、文献⁽³⁸⁾によると粒径 0.075mm 以下である。材料の大半を占める砂の粒径は 5.0mm 以下であり、難透水性覆土の骨格を主形成していることから、ベントナイトは力学的な作用に寄与しない。フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、同様に品質(密度および粒度分布)に有意なばらつきのない砂および有意な力学的影響を与えないベントナイトで作製し、廃棄物埋設地においても三軸圧縮試験の供試体と同様の品質で施工すると考えられる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(b) 下部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた下部覆土の供試体は、ベントナイト、砕砂および砕石を

混合しない現地発生土単体である。

下部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度および粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じてベントナイト、砕砂および砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂および砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、下部覆土に砕砂および砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(c) 上部覆土の供試体

三軸圧縮試験に用いた上部覆土の供試体は、砕砂および砕石を混合しない現地発生土単体である。

上部覆土の材料は、現地発生土を用いるため、品質(密度および粒度分布)にばらつきがあることから、必要に応じて砕砂および砕石により調整を行うこととしている。一方で、フィッティングに用いる三軸圧縮試験の供試体は、現地発生土単体を対象としている。現地発生土単体は、平均粒径が大きい砕砂および砕石を混合した場合よりも剛性が小さくなる。そのため、現地発生土単体により設定された解析用物性値は、上部覆土に砕砂および砕石を混合した場合よりも、変形を大きく表現できる。

以上のことから、今回の三軸圧縮試験に対するシミュレーション解析でフィッティングさせる解析用物性値は、廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

f. シミュレーション解析

(a) 三軸圧縮試験の解析モデル

三軸圧縮試験のシミュレーションモデルを図 4.3-8 に示す。供試体モデルは、実際の三軸圧縮試験と同様に幅 50mm、高さ 100mm として作成した。粒子数は 24,485 個である。

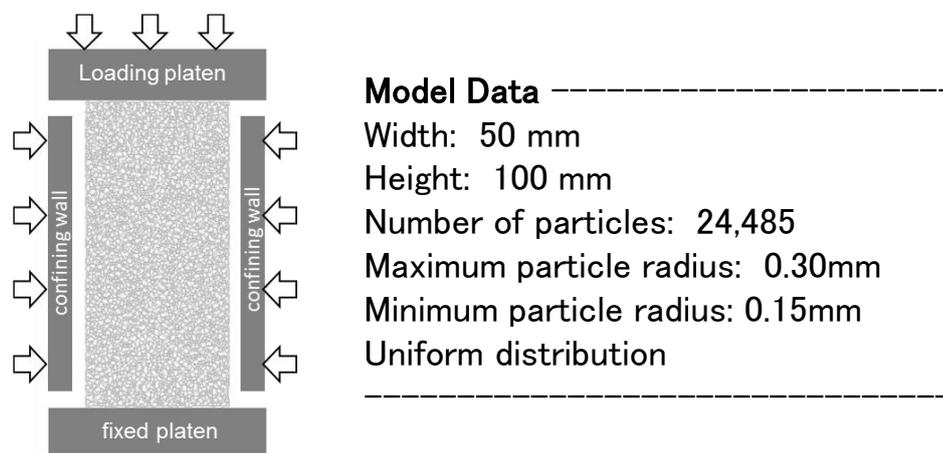


図 4.3-8 三軸圧縮試験のシミュレーションモデル

粒子間結合モデルの概念図を図 4.3-9 に示す。

粒子間結合モデルは、廃棄物埋設地に生じる膨張現象を考慮して設定する。廃棄物埋設地においては、覆土の厚さが十数 m 以上あるため、土圧による圧縮場での拘束圧が作用した状態である。また、金属腐食による膨張は、この拘束圧が作用した場において生じることとなる。

金属腐食の膨張に伴い、覆土には内側から押し広げられる方向に応力が加えられることから、覆土内部では圧縮応力およびせん断応力が支配的に作用している状態となると考えられる。そのため、本 DEM 解析においては、粒子が接触しているときの圧縮挙動およびせん断挙動の再現性が重要であり、法線方向および接線方向にバネおよびスライダーを直列で設定した。

一方で、上記の応力状態を考慮すると、粒子が離れようとするときのせん断挙動は限定的であり、覆土全体の挙動における再現性への影響が小さいことから、バネのみを設定した。粒子間結合モデルに付与するそれぞれの機能を以下に示す。

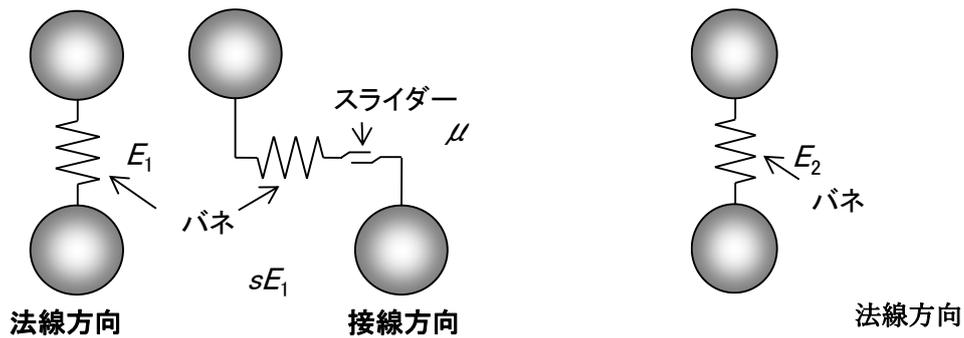
また、参考として、粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係を表 4.3-4 に示す。

[粒子が接しているとき]

- ・法線方向のバネ(E_1): 圧縮方向において覆土の剛性を表現する
- ・接線方向のバネ(sE_1): せん断方向において覆土の剛性を表現する
- ・接線方向のスライダー(μ): せん断方向において摩擦抵抗力を表現する

[粒子が離れようとするとき]

- ・法線方向のバネ(E_2): 引張方向において覆土の剛性を表現する



粒子が接触しているとき

粒子が離れようとするとき

- ・粒子同士が接触しているときは、バネによる反発力およびスライダーによる摩擦力が作用する。
- ・粒子同士が離れようとするときは、バネによる引張力が作用する。
- ・引張力がバネの結合強度 σ_{\max} を超えるとバネが破断し粒子同士が離れ、再び粒子同士が接触することによって結合力が再生する。
- ・粒子の要素は剛体とし、要素自体が変形するなどの挙動は示さないものとする。

図 4.3-9 粒子間結合モデルの概念図

表 4.3-4 粒子間結合モデルにおける応力とひずみの関係

	粒子が接触しているとき	粒子が離れようとするとき
法線方向		
接線方向		—

(b) 解析方法

シミュレーション解析は、実際の三軸圧縮試験と同様に供試体モデル下部の載荷盤を固定しておき、側部および上部の載荷盤から一定の拘束圧を作用させた状態で上部の載荷盤を動かすことにより実施した。

軸方向応力は、供試体モデル上端の粒子から上部の載荷盤に作用する反発力の総和を供試体モデルの幅で除すことにより算出した。

ひずみについては、供試体モデルの上下左右各辺付近の粒子を 10 個ずつ選出し、それらの粒子の相対的な変位を計測し、それぞれ平均をとることにより算出した。

g. フィッティング

三軸圧縮試験により得られた各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線に対して、シミュレーション解析により得られる各覆土の主応力差-軸ひずみ曲線が適合するまで、パラメータを繰り返し補正することをフィッティングという。フィッティングが完了した時点のパラメータが解析用物性値となる。

(a) 難透水性覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を図 4.3-10 に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できているため、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、拘束圧 170kPa のシミュレーション解析のうちひずみ 10%以降において、三軸圧縮試験結果に対して主応力差がわずかに上昇している箇所がある。これは、シミュレーションモデルにおいては、側部に設置している剛体壁を介して拘束圧を与えており、ひずみが大きくなると供試体の変形を押さえつける作用が働くために起きていると考えられる。三軸圧縮試験においては供試体の側部のゴムスリーブを介して拘束圧を与えており、変形を許容していることから、変形を押さえつける作用が生じていない。廃棄物埋設地モデルは、モデルサイズが大きく上部が解放されていることから、上記のような変形を押さえつける作用が生じないと考えられる。

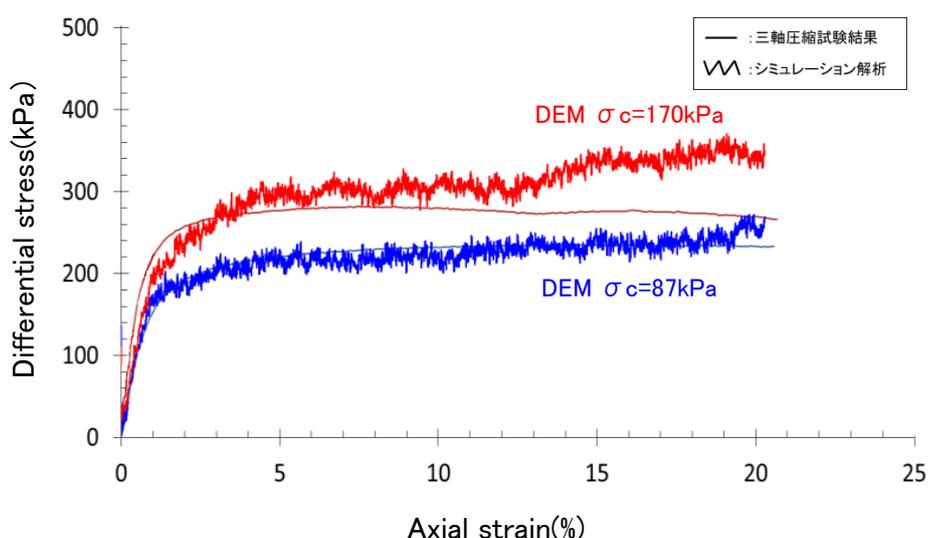


図 4.3-10 難透水性覆土に対する三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析の比較

(b) 下部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を図 4.3-11 に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

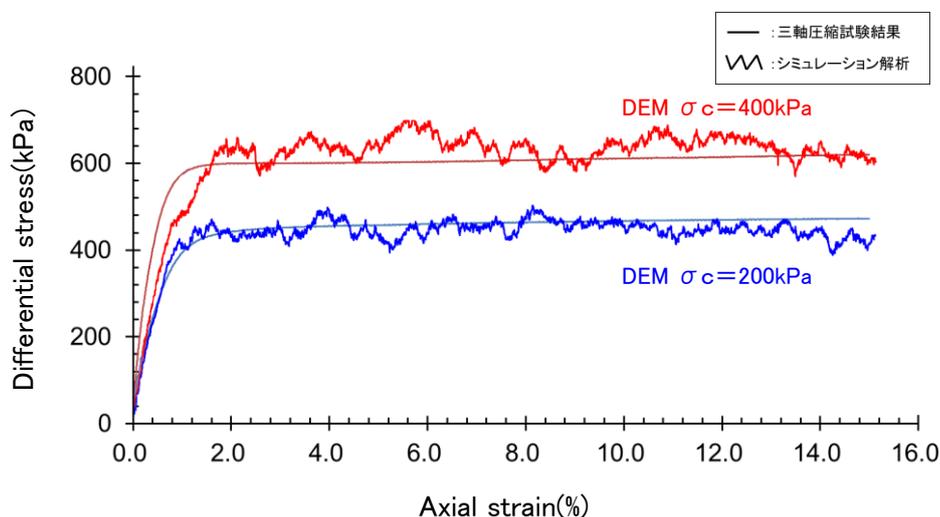


図 4.3-11 下部覆土に対する三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析の比較

(c) 上部覆土に対するフィッティング

三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析により算出した主応力差-軸ひずみ曲線を図 4.3-12 に示す。ひずみ初期の傾きが剛性を示しており、剛性が小さいほど応力に対して大きな変形を示す。三軸圧縮試験結果の剛性に対して、シミュレーション解析結果の剛性が小さいことから、解析により算出される変位量は大きく再現される。

以上のことから、三軸圧縮試験結果に対し、シミュレーションの結果がおおむね良好に再現できていることから、本フィッティングで設定された解析用物性値を用いる。

なお、上部覆土は、力学的影響評価の対象としている低透水性機能を有する難透水性覆土および下部覆土への上載荷重が作用していれば良い。

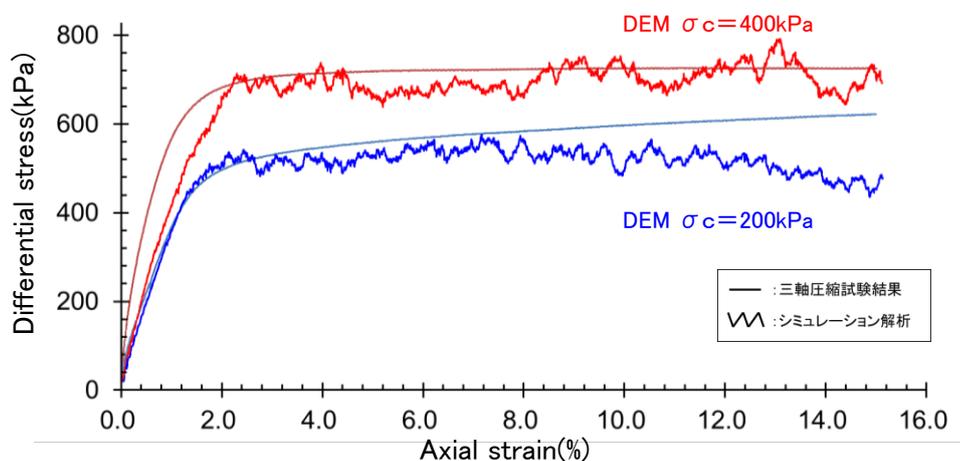


図 4.3-12 上部覆土に対する三軸圧縮試験結果およびシミュレーション解析の比較

h. 解析用物性値のまとめ

(a) シミュレーション解析によりフィッティングさせた解析用物性値

解析用物性値のフィッティングにより設定した難透水性覆土、下部覆土および上部覆土の解析用物性値を表 4.3-5 に示す。

表 4.3-5 解析用物性値一覧

設定	設定値			単位	設定方法
	難透水性覆土	下部覆土	上部覆土		
密度	1,649	1,940	1,500	kg/m ³	対象部材の土粒子密度試験より算出し、設定する。
最大粒子半径	100	100	100	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
最小粒子半径	50	50	50	mm	解析モデル上、表現が可能となる範囲にて設定する。
粒度分布	-	-	-	-	解析モデルにあわせて設定する。
法線方向弾性バネ 1 弾性係数(E_1)	55	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
法線方向弾性バネ 2 弾性係数(E_2)	600	200	140	MPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
弾性バネ定数比(s)	1.0	1.0	1.0	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
粒子間摩擦係数(μ)	0.4	0.5	0.4	-	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。
結合強度(σ_{amax})	330	1,000	1,200	kPa	三軸圧縮試験のシミュレーションより設定する。

(b) 廃棄物埋設地の解析モデルへの適用性

大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに対して、三軸圧縮試験のシミュレーションモデルでフィッティングした解析用物性値を適用させることについて、以下のとおり考察する。

三軸圧縮試験結果では、5%以降のひずみ領域において応力の変動は見られず、覆土がせん断破壊後の残留状態となり、残留強度を発現していると考えられる。

文献⁽³⁶⁾によると残留強度はせん断抵抗がピーク値（せん断強さ）を超え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される。また、原位置において移動距離の大きい地すべり面でのせん断強さに相当すると考えられており⁽³⁹⁾、廃棄物埋設地の覆土においても大変形時に発現する強度であるといえる。さらに、室内試験によるせん断破壊後、せん断面において最終的にペッド(複数の土粒子が集まって集合体を形成したもの)の再配列が完了し、完全配向状態となった段階で、残留強度状態に収束するとされている⁽⁴⁰⁾。そのため、15%以降のひずみ領域においても、残留状態に達した覆土はひずみ量の増加によらず継続的に同じ性質を示す。

以上のことから、15%までのひずみを対象としたシミュレーション解析でフィッティングさせた解析用物性値は、残留状態に至るまでの状況を再現できているため、大変形を与える廃棄物埋設地の解析モデルに適用可能であると判断する。

(5) DEM 解析結果

① 覆土の変形方向による力学的影響の確認

前項までに設定したパラメータを用いて DEM 解析を実施した。解析では、覆土の形状変化に大きな影響を与える状態を確認するため、表 4.3-2 で設定した変形方向の 2 種類の設定を併記することで形状変化を確認する。解析結果を図 4.3-13 および図 4.3-14 に示す。図 4.3-13 および図 4.3-14 より、表 4.3-3 の変位を与えた際の覆土の形状変化は、鉛直・水平方向への変形による影響が大きいことが確認された。

そのため、覆土の透水係数および厚さへの影響については、鉛直・水平方向への変形を対象に評価する。

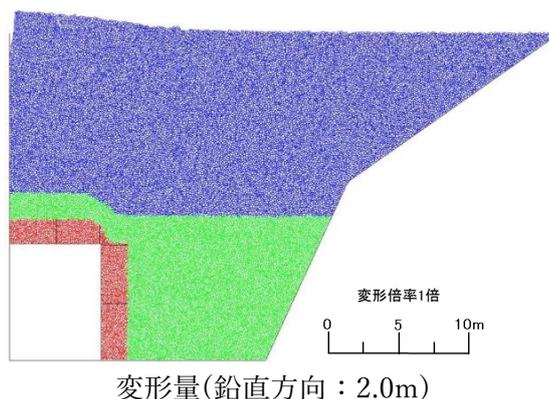


図 4.3-13 鉛直方向へ卓越した変形ケースにおける解析結果

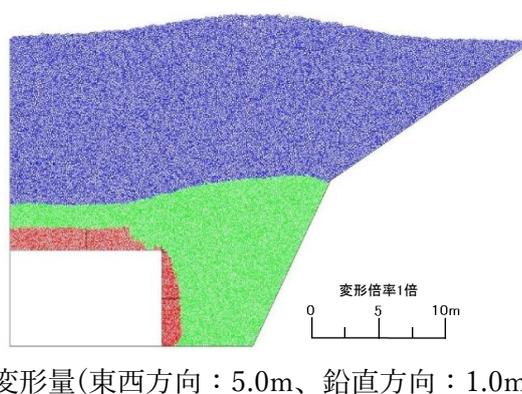


図 4.3-14 鉛直・水平方向への変形ケースにおける解析結果

② 覆土厚さの評価

覆土の厚さは、弱部と考えられる隅角部に残存している難透水性覆土の厚さを確認することで評価する。

最も可能性が高い設定の膨張量(東西方向： $3.50 \times 10^{-1}m$ 、鉛直方向： $3.64 \times 10^{-2}m$)および最も厳しい設定の膨張量(東西方向： 5.00×10^0m 、鉛直方向： $5.20 \times 10^{-1}m$)を考慮して鉛直・水平方向の変形ケースのうち、以下の3種類の変形状態に対する隅角部の拡大図を図 4.3-15 に示す。

- ・ 状態 A 解析の初期状態
- ・ 状態 B 最も可能性が高い設定以上に変形した状態
(変形量 東西方向：3.0m、鉛直方向：0.6m)
- ・ 状態 C 最も厳しい設定以上に変形した状態
(変形量 東西方向：5.0m、鉛直方向：1.0m)

解析結果から、最も可能性が高い設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口は生じず、厚さが約 1m 残る状態が確認されたが、金属腐食の膨張量が解析の変形量に比して十分小さいことから、厚さが 1m 以上残る状態を最も可能性が高い設定の設定値とする。また、最も厳しい設定以上の変形を与えた際の隅角部では、難透水性覆土に開口(約 2m)が生じる可能性が確認されたため、隅角部に約 2m の開口が生じる状態を最も厳しい設定の設定値とする。

なお、解析結果より、難透水性覆土の厚さが減少した隅角部は、覆土材料が存在しない空洞のような状態ではなく、下部覆土に置き換わっていることを確認している。また、下部覆土は、難透水性覆土の解析結果から、覆土厚さへ有意な影響が生じないと設定する。

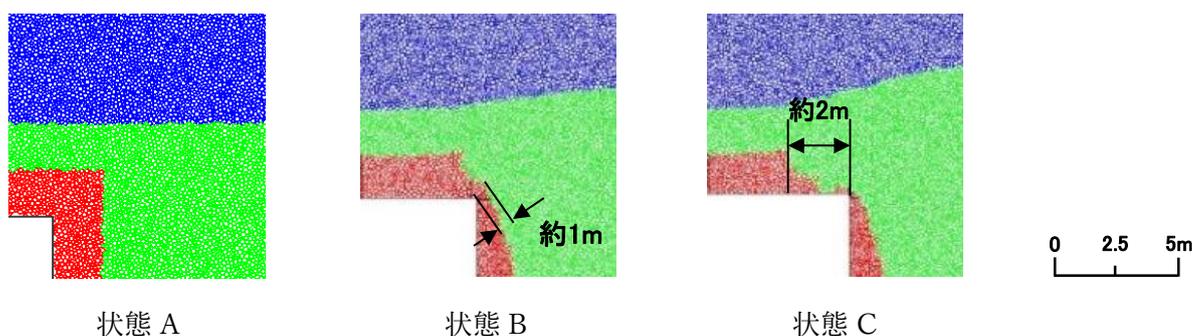


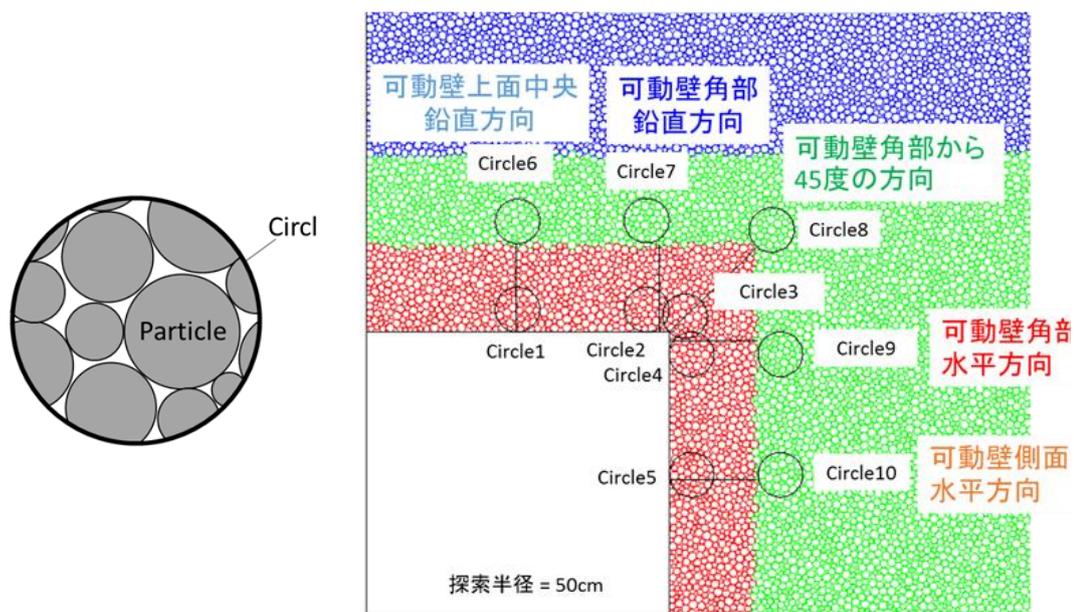
図 4.3-15 鉛直・水平方向の変形ケースにおける弱部(隅角部)の拡大図

③ 覆土の透水係数の評価

覆土の透水係数への影響は、密度と相関があることから、変形前後の密度を確認することで評価する。DEM 解析に用いられている粒子の大きさ、空隙構造や空隙量が実態の土粒子と異なるため、定量的な評価を行うことは困難であるが、定性的な変化を把握するため、密度の増加率を確認することで評価する。

密度は図 4.3-16 b.に示すとおり、解析に半径 50cm の Circle を設定し、Circle 内に含まれる粒子の面積に粒子密度をかけたものを足し合わせ、Circle 面積により割り込むことで算出する。算出箇所に関しては、図 4.3-16 に示したとおり難透水性覆土および下部覆土を対象とした 10 箇所とする。密度の増加率を算出した結果を表 4.3-6 に示す。

表 4.3-6 より、覆土の密度減少は軽微であることから、密度変化により覆土の透水係数が増加する有意な影響は生じない。



a. 密度の算出概念

b. 密度の算出位置*1、2

*1 : Circle1~Circle5 : 難透水性覆土層と可動壁の接触位置

*2 : Circle6~Circle10 : 難透水性覆土層の外周

図 4.3-16 密度の算出方法の概念図

表 4.3-6 鉛直・水平方向への変形時における密度の増加率

測定位置	鉛直・水平方向への変形	
	図 4.3-15 のうち状態 B	図 4.3-15 のうち状態 C
	密度の増加率(%)*1	密度の増加率(%)*1
Circle1	-0.8	0.3
Circle2	-2.0	1.7
Circle3	12.3	12.3
Circle4	7.3	16.3
Circle5	21.8	30.9
Circle6	-0.9	-1.9
Circle7	-4.0	-7.1
Circle8	0.9	0.0
Circle9	-4.2	5.1
Circle10	7.8	11.5

*1 : 負の値は、密度低下を示す。

(6) 1,000 年後の力学的影響評価

金属および埋設設備の膨張影響に起因する影響において、DEM 解析により覆土の低透水性への影響評価を行った結果から、透水係数に変化は生じないものの覆土厚さに力学的変形が生じると設定する。金属および埋設設備の膨張による覆土への力学的影響評価を表 4.3-7 に示す。

なお、力学的影響(膨張量)を直接的に覆土へ与えた際の等価透水係数を試算した場合においても、DEM 解析と等価透水係数が同等であったため、力学的影響(膨張量)による線量評価への有意な影響は生じないとする。

表 4.3-7 金属および埋設設備の膨張による 1,000 年後の覆土への力学的影響評価

対象設備 (対象廃棄物)	変形 形態	力学的変形	
		最も可能性が高い設定	最も厳しい設定
2号および3号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部に約2mの開口が生じる状態 ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態
1号 (充填固化体)	膨張	○難透水性覆土 隅角部の厚さが1m以上残る状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態	○難透水性覆土 隅角部の厚さがほぼ残らない状態 (開口無し) ○下部覆土 破断や厚さの変化が生じない状態

4.4 化学的影響評価

4.4.1 影響事象の概要

難透水性覆土に対する安全機能として低透水性が期待されている。難透水性覆土の透水性は、ベントナイト系材料に含まれる膨潤性鉱物であるモンモリロナイトにより支配されていることが知られている [17]。一方、廃棄体固型化材や埋設設備には多量のセメント系材料が用いられている。セメント系材料と接触した地下水は、セメント系材料から溶出するセメント成分や 1 号廃棄体埋設地に埋設された廃棄体に含まれる可溶性塩により組成が変化し、高アルカリ性となる。高アルカリ性の地下水は、ベントナイト系材料中のモンモリロナイトを溶解あるいは変質させ、難透水性覆土の低透水性機能が次第に低下することが懸念される。

4.4.2 検討手順

ここでは、これらの化学的影響を考慮しても難透水性覆土の低透水性が、期待する期間において維持されることを確認するため、難透水性覆土とセメント系材料を接触させた反応系における地球化学解析により、難透水性覆土中の等価透水係数の変遷を評価した。評価期間は、廃止措置の開始後の確からしい評価期間として 1,000 年後とした。(また、参考として地下水シナリオにおいて移行抑制機能を期待する数万年(20,000 年後)についても評価した。)

なお、1 号および 3 号廃棄体埋設地の評価結果を併記する。

4.4.3 影響評価

(1) 化学的影響評価の考え方

本解析では、難透水性覆土へのアルカリ成分の移行挙動とモンモリロナイトの化学的な溶解を連成させて評価する必要があるため、これらを連成して解析できる PHREEQC-TRANS(化学反応物質移行連成解析コード)により、セメント系材料が用いられる埋設設備から難透水性覆土へのアルカリ成分の移行および化学反応を評価した。

(2) 化学的影響評価手法

本解析で用いた PHREEQC-TRANS で中心となる地球化学解析は、アメリカ地質調査所(USGS)が開発・公開している PHREEQC [18] [19] をベースとしている。PHREEQC はソ

ースプログラムが公開されており、広く検証されている [20]。また、PHREEQC-TRANS は地球化学解析と物質移行解析を連成させることで、地球化学反応の進展に伴う物質移行パラメータ(空隙率、拡散係数)の変化も同時に反映しながら、長期の変質挙動を解析することができる解析コードである。

4.4.4 覆土の主な仕様

(1) 解析に用いる諸条件の設定

① 解析モデル

本解析では、地下水は廃棄物埋設地の下部より流入し、廃棄物埋設地内を通過して再び廃棄物埋設地下部より流出することから、セメント系材料から難透水性覆土への移流成分は少ないと想定される。そのため地球化学解析における物質移行は拡散によるのみ起こるものとした。

なお、埋設設備周辺の難透水性覆土および下部覆土において、ペクレ数分布より、評価期間内で拡散場が継続することを確認している。

解析モデルについては、廃棄物埋設地で用いられるセメント系材料が難透水性覆土に与える影響を検討するため、セメント系材料と難透水性覆土が接する領域を解析対象とした1次元モデルを設定した。難透水性覆土の厚さは2mを設定した。

ここで、難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解量は、セメント系材料から溶出し難透水性覆土へ移行して化学反応に寄与するアルカリ量で決定される。セメント系材料のアルカリ量は、セメント系材料の種類や配合に加え、体積により決定される。1次元体系では、体積は各材料のモデル長さに反映される。そこで、セメント系材料のモデル長さは、難透水性覆土に対して十分な長さとして、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分(3号廃棄物埋設地では64mの半分の32m、1号廃棄物埋設地では24.4mの半分の12.2m)の長さを設定した。(難透水性覆土とセメント系材料の体積比を考慮すると、難透水性覆土2mに対するセメント系材料の長さは、埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さより短い。)

なお、2号廃棄物埋設地は、3号廃棄物埋設地と同種の廃棄体(充填固化体)および類似施設であり、解析結果はいずれかの廃棄物埋設地で代表することができる。埋設設備の一基当たりの外形寸法の最大幅の半分の長さをセメント系材料のモデル長さに設定する場合、2号廃棄物埋設地と比べ3号廃棄物埋設地の方が長く、その分アルカリ量は多くなることから、3号廃棄物埋設地の解析結果で代表することとした。一方、1号廃

廃棄物埋設地については、廃棄体(均質・均一固化体)に塩類(硫酸塩、ほう酸塩)が含まれているため、セメント系材料から浸出してくるアルカリ成分に加え、廃棄体から溶出する塩が難透水性覆土に含まれるモンモリロナイトの変質に影響を及ぼす可能性がある。そのため、3号廃棄物埋設地とは別に解析を行うこととした。

以上より、解析では3号および1号廃棄物埋設地を評価対象とした。

また、本解析では、難透水性覆土とセメント系材料の相互作用に着目するため、難透水性覆土とセメント系材料のみが反応し、下部覆土および岩盤は反応しないものとした。境界条件に関して、難透水性覆土端から離れた点では、セメント影響を受けずに地下水組成と同じ液相組成になると考えられるため、地下水組成固定条件を設定した。一方、セメント系材料端は、セメント系材料の成分がセメント系材料の端から解析体系外へ移行しないように濃度勾配ゼロの境界条件(反射条件)とした。3号および1号廃棄物埋設地の解析体系の概念図を図4.4-1に示す。

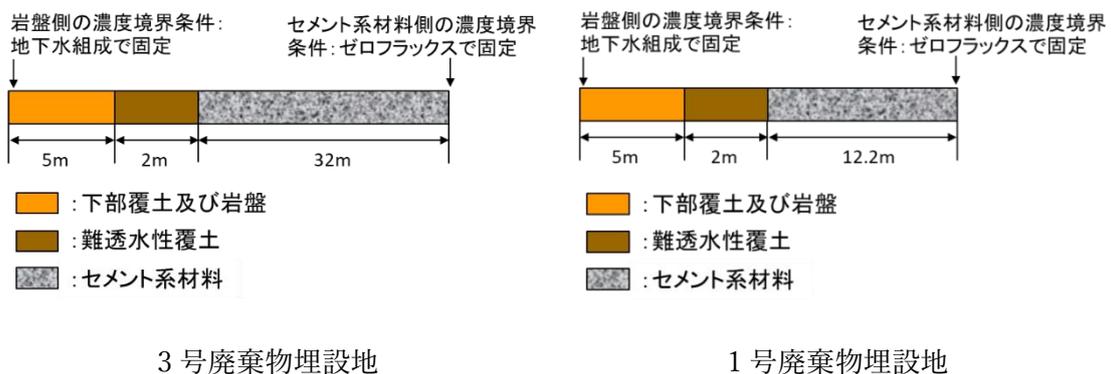


図 4.4-1 解析体系概念図

② 地下水組成

廃棄物埋設地周辺の地下水組成は、淡水で地表付近の地下水であるという特性をふまえて地表付近の淡水と大気圧との平衡を考慮したモデル地下水 FOHP(Fresh-Oxidizing-High-pH) [21]を参照することとした。解析で設定した地下水組成を表 4.4-1 に示す。

表 4.4-1 設定した地下水組成

pH	8.46
Na	$3.22 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
K	$5.79 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
Ca	$1.01 \times 10^{-4} \text{mol/L}$
Mg	$6.50 \times 10^{-5} \text{mol/L}$
C	$3.54 \times 10^{-3} \text{mol/L}$
S	$1.00 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Cl	$4.40 \times 10^{-6} \text{mol/L}$
Al	$3.61 \times 10^{-7} \text{mol/L}$
Si	$3.40 \times 10^{-4} \text{mol/L}$

③ 難透水性覆土の設定

a. 難透水性覆土の鉱物組成

ここでは Ca 型ベントナイト(クニボンド)を 3 割配合した材料仕様とした。難透水性覆土の乾燥密度は 1.61Mg/m^3 と設定した。難透水性覆土の初期鉱物組成を表 4.4-2 に示す。

表 4.4-2 難透水性覆土の初期鉱物組成

	Ca 型ベントナイト(クニボンド) 30wt%				
	モンモリロナイト				随伴鉱物
	Na-Mont	Ca-Mont	K-Mont	Mg-Mont	カルセドニ
mol/L_water*1	0.33	1.94	0.06	0.23	2.94

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

b. モンモリロナイトの溶解速度

モンモリロナイトの溶解速度は TRU2 次レポート [12]で使用されている式を使用

した。セメント由来の高 pH 溶液の影響を考慮するため、Sato et al.(2004) [22]がモンモリロナイト試料を用いて種々の pH 条件(8~13)におけるフロースルー試験で測定された溶解速度の結果より、pH の関数として求めた溶解速度式と平衡に接近した場合のモンモリロナイトの溶解速度に対する飽和依存性の式について、Cama et al.(2000) [23]がモンモリロナイトの溶解速度実験データに基づきフィッティングによって求めた経験式を合わせた数式 1 を用いた。文献 [24]では、強アルカリ性条件では、Cama et al.(2000)が弱アルカリ条件で求めた溶解速度の ΔGr 依存性よりも、より小さい ΔGr (より不飽和な環境)で溶解速度が小さくなることが確認されていること(図 4.4-2)から、Cama 式を適用した。

なお、図 4.4-2 における数値中の E は、指数表記における基数の 10 を示す(例えば、1E+2 は 1×10^2 を示す。以下、同様。)

また、鉱物の反応表面積は、モンモリロナイトの比表面積として Yokoyama, S. et al.(2005) [25]にて N_2 -BET 法で算出された $7m^2/g$ を用いてモンモリロナイト 1mol 当たりの反応表面積に換算して使用した。

$$Rate = \left(4.74 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-39.57/RT} \cdot \frac{177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 177 \cdot e^{20.37/RT} \cdot a_{OH^-}} + 1.70 \cdot e^{69.67/RT} \right. \\ \left. \cdot \frac{0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}}{1 + 0.0297 \cdot e^{23.53/RT} \cdot a_{OH^-}} \right) \cdot A_{min} \cdot \{1 - \exp(6 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot \Delta Gr/RT)^6)\}$$

(数式 1)

Rate : モンモリロナイトの溶解速度[mol/s]

R : 気体定数[kJ/(K·mol)]

T : 絶対温度[K]

a_{OH^-} : OH⁻イオンの活量

A_{min} : 鉱物の反応表面積[m²]

ΔGr : 反応のギブス自由エネルギー変化(化学親和力)[kJ/mol]

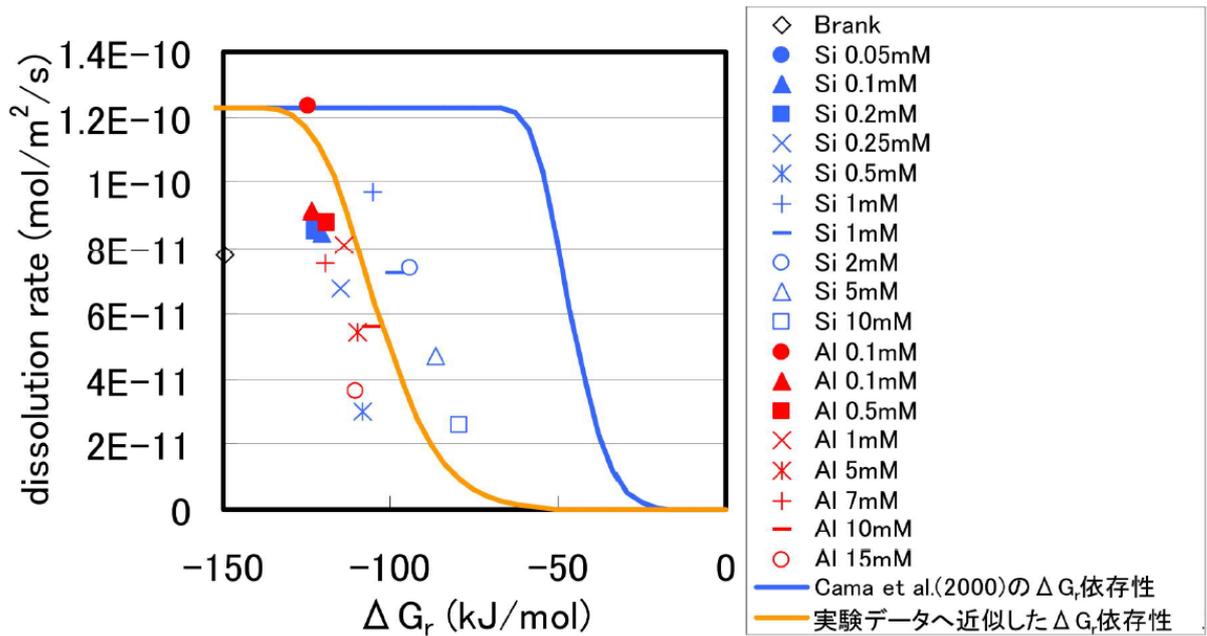


図 4.4-2 モンモリロナイトの溶解速度と化学親和力 ΔG_r の関係(文献 [24])

c. 難透水性覆土の透水係数の変遷評価式

難透水性覆土の透水係数は、TRU2 次レポート [12]で使用されている、ベントナイトに対し様々な条件下で求めた透水係数の実測値に基づき、伊藤ら(2005) [17]が求めたベントナイトと透水係数の関係式(数式 2)を使用した。

$$K = 10^{1.30 \cdot C_i} \cdot e_{sme}^{3.48 \cdot C_i} \cdot K_0 \quad (\text{数式 2})$$

ただし、 $C_i > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $C_i = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$K > 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme} - 0.24} \cdot K_0$

$K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} & e_{sme} \leq 7.0 \\ (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times 7.0^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} & 7.0 < e_{sme} \end{cases}$$

ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

C_i : 空隙水の当量イオン濃度[eq/L]

ESP : ベントナイトの交換性ナトリウム割合[-]

e_{sme} : スメクタイト間隙比[-]

K : 透水係数[m/s]

難透水性覆土全体の透水係数に関しては、文献 [26]を参考に、図 4.4-3 に示すように異なる透水係数を持つ材料に対して直列となる方向の透水性を考えた場合の系全体の透水係数(等価透水係数)で表現した。

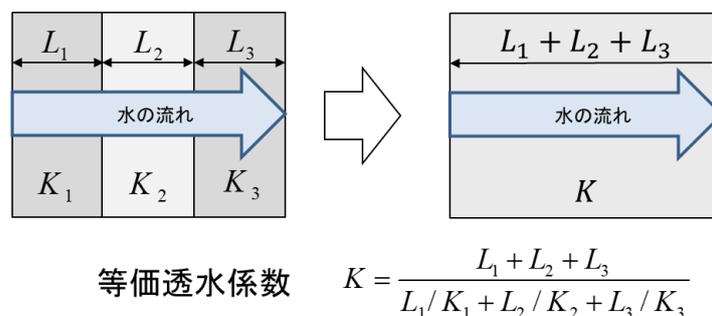


図 4.4-3 等価透水係数の設定(直列)

d. 難透水性覆土の拡散係数

難透水性覆土中の拡散係数は、TRU2 次レポート [12]で使用されている、空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式 [27] (数式 3)を設定した現実的な拡散モデルとした(以下「ケース①」という。最も可能性が高い設定に相当する。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon^n \quad (\text{数式 3})$$

$$n = 2.22f_s^{0.13} + 1$$

$$f_s = a \times f_b$$

D_e : 実効拡散係数[m²/s]

ε : 空隙率[-]

a : ベントナイト中のモンモリロナイト割合[-]

f_b : ベントナイトの配合割合[-]

また、上記で設定した経験式(数式 3)において、ベントナイト中のモンモリロナイトの割合 a (若しくはベントナイトの配合割合 f_b)を 0 とした場合、 ε の指数 n は 1 となり、実効拡散係数は単純に空隙率に比例するという拡散モデル(拡散係数が大きい方が、アルカリ成分が難透水性覆土中を移動する速度を大きく見積もることになり、

モンモリロナイトの溶解が広範囲に広がる可能性がある)となる(数式 4)。そのため数式 4 を用いた解析も行った(以下「ケース②」という。最も厳しい設定に相当する。)

$$D_e = 2.27 \times 10^{-9} \times \varepsilon \quad (\text{数式 4})$$

④ セメント系材料の設定

a. セメント系材料の鉱物組成

廃棄物埋設地で使用されているセメント系材料のうち、充填モルタルの配合を参照した。

なお、3号廃棄物埋設地の充填モルタルの配合は候補配合とした。初期鉱物組成の算定方法は、文献 [28] に記載されている算定方法を参考した。参照した算定方法では、初期鉱物として C-S-H ゲル、ハイドロタルサイト、エトリンサイト、(余剰 Al₂O₃ をギブサイト)、NaOH、KOH を想定しており、セメント系材料のバッチ式浸漬実験との比較において、液相成分の再現性が高く、適用可能なモデルであることが示されたもの [28] である。

なお、どちらの条件においても、骨材については反応しないものとした。

(a) 3号廃棄物埋設地

ここでは 3 号廃棄物埋設地の充填モルタルの候補配合とした。3 号廃棄物埋設地の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を表 4.4-3 に示す。

表 4.4-3 セメント系材料の初期鉱物組成(3号廃棄物埋設地)

	結合材(C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロ タルサイ ト	エトリン サイト	ギブサイ ト	NaOH	KOH
mol/L_water*1	9.51	0.33	0.04	0.94	0.03	0.03

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

(b) 1号廃棄物埋設地

1 号廃棄物埋設地で使用されている配合を参照した。1 号廃棄物埋設地の解析で設定したセメント系材料の初期鉱物組成を表 4.4-4 に示す。

表 4.4-4 セメント系材料の初期鉱物組成(1号廃棄物埋設地)

	結合材(C)					
	C-S-H ゲル	ハイドロ タルサイト	エトリン ガイト	ギブサイト	NaOH	KOH
mol/L_water*1	6.46	0.41	0.01	1.19	0.01	0.01

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質質量

b. 廃棄体に含まれる塩量 (1号廃棄物埋設地)

1号廃棄物埋設地の廃棄体(均質・均一固化体)に含まれる塩類(ほう酸塩および硫酸塩)の量について、1号廃棄物埋設地の埋設実績から集計を用いて設定した。また、セメント系材料の幾何学的な劣化(ひび割れ)に伴い1号廃棄物埋設地内には、地下水は難透水性覆土が設置されていない下部から入り込み、主に下部から岩盤中へと移行していく。したがって、廃棄物埋設地内に存在する塩の大半は、それらの流れに乗って岩盤中へ移動していくと考えられる(図 4.4-4)。廃棄物埋設地から流出する全体の流量のうち、難透水性覆土へ移動する流量を踏まえ、本解析では、難透水性覆土へ移動する塩量を全体の10%と設定した。1号廃棄物埋設地の解析で設定した塩濃度を表 4.4-5 に示す。

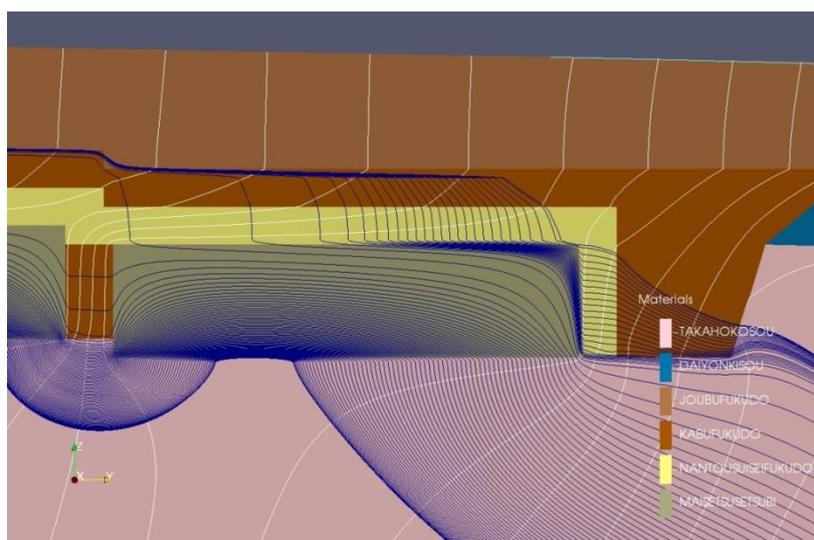


図 4.4-4 廃棄物埋設地の地下水流動概念図

表 4.4-5 解析で設定した塩濃度

ほう酸塩($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	硫酸塩(Na_2SO_4)
0.01mol/L_water*1	0.07mol/L_water*1

*1：空隙水 1L に対する鉱物の物質量

c. セメント系材料の拡散係数

セメント系材料中の拡散係数については、セメント系材料は長期的に化学劣化以外の幾何学的劣化(ひび割れ)が想定されるため、物質移動が速い状態となることを想定し、拡散係数として自由水中のトリチウム水の拡散係数($2.27 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ [29])を設定した(拡散係数が大きい方がアルカリ供給速度は大きく見積もられる。)

⑤ 生成を想定した二次鉱物

セメント系材料と地下水が反応した溶液が難透水性覆土へ移行する際に難透水性覆土中のモンモリロナイトの溶解が生じると、空隙水中の Si や Al あるいは Mg といった反応生成物である溶存化学種の濃度が徐々に上昇し、条件に応じて過飽和となり、種々の二次鉱物が沈殿すると考えられる。生成する二次鉱物の種類によって、溶液組成や pH、空隙率に変化し、難透水性覆土の透水性に影響を及ぼす可能性がある。

文献 [30]では、セメント系材料と反応した溶液と接する緩衝材(ベントナイト系材料)の鉱物学的変化の可能性について、室内試験結果、関連する天然事例から得られる情報に基づき考察を行い、多様な系の特徴に応じて生成頻度が高いと判断された鉱物をまとめている。

一方、二次鉱物の変遷は熱力学的平衡だけでなく反応速度の影響を受ける。しかしながら、反応速度に関する知見は乏しく反応速度の影響を定量的に表現するのは困難である。文献 [30]では、熱力学的に安定な鉱物(安定相)、安定相と比べ相対的に準安定な鉱物(準安定相)に分類し、複数の鉱物変遷シナリオを作成している。本解析では、生成する可能性がある二次鉱物を幅広く網羅するために、準安定相や安定相を含め多くの二次鉱物を設定した(表 4.4-6)。

表 4.4-6 生成を想定した二次鉱物

フィリップサイト	ブルーサイト	C_3ASH_4
クリノプチロライト	カルサイト	C_4AH_{13}
ヒューランダイト	ドロマイト	C_4AH_{19}
C-S-H ゲル	カルセドニ	ゲーレナイト水和物
エトリンガイト	カリ長石	カオリナイト
モノサルフェート	アナルサイム	パイロフィライト
ハイドロタルサイト	ローモンタイト	フリーデル氏塩
セピオライト	イライト	2 水石膏
ポルトランダイト		

また、1号廃棄物埋設地では、廃棄体に含まれる塩とセメント成分およびベントナイトが反応して二次鉱物が生成する可能性も考えられる。そこで、塩影響に係る二次鉱物として Na および Ca を含むほう酸塩および硫酸塩を設定した(表 4.4-7)。1号廃棄物埋設地を対象とした解析では、表 4.4-6 に加え表 4.4-7 を設定した。

表 4.4-7 塩影響を考慮した際に生成を想定した二次鉱物(1号廃棄物埋設地で設定)

ほう酸塩	硫酸塩
$Ca_3B_2O_6$	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$
CaB_4O_7	Thaumasite
CaB_2O_4	エトリンガイト
$NaBO_2$	2 水石膏
Colemanite	

⑥ 熱力学データベース

熱力学データベースは、TRU2 次レポート [12]で使用されていた JNC-TDB.TRU [31]をベースに、C-S-H ゲルの熱力学データとして A. Atkinson [32]のデータを追加して使用した。1号廃棄物埋設地ではセメント・ベントナイト相互作用だけでなく廃棄体に含まれる塩類による影響も評価するため、液相中のイオン濃度が高濃度になることが

予想される。そのため、イオン強度が高い領域でも適用可能な活量補正モデルを用いる必要がある。ここでは、PHREEQC に同梱されている SIT モデルに対応した熱力学データベース(sit.dat)を用いた。

(2) FreeqC 解析結果

① 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合（ケース①）

難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式とした現実的なモデル(数式 3)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を図 4.4-5 に、1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を図 4.4-6 に示す。また、3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を図 4.4-7 に、難透水性覆土内の液相組成分布図を図 4.4-8 に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を図 4.4-9 に示す。1号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図を図 4.4-10 に、難透水性覆土内の液相組成分布図を図 4.4-11 に、参考として覆土にアルカリ成分を供給する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を図 4.4-12 に示す。

3号廃棄物埋設地の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000年後には、セメント系材料と接する面ではベントナイトが若干溶解することにより透水係数がわずかに上昇するものの、それより内側の領域ではベントナイトの変質は見られず透水係数も初期値を維持していた。一方で、岩盤側ではベントナイトの変質はごくわずかであり透水係数の上昇も見られなかった。1号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000年後の段階で、セメント系材料境界近傍のベントナイトが全溶解している層があった。セメント系材料由来のアルカリ成分の他に廃棄体に含まれる塩の影響を受け、3号廃棄物埋設地の結果よりも早い段階からベントナイトの変質が見られた。

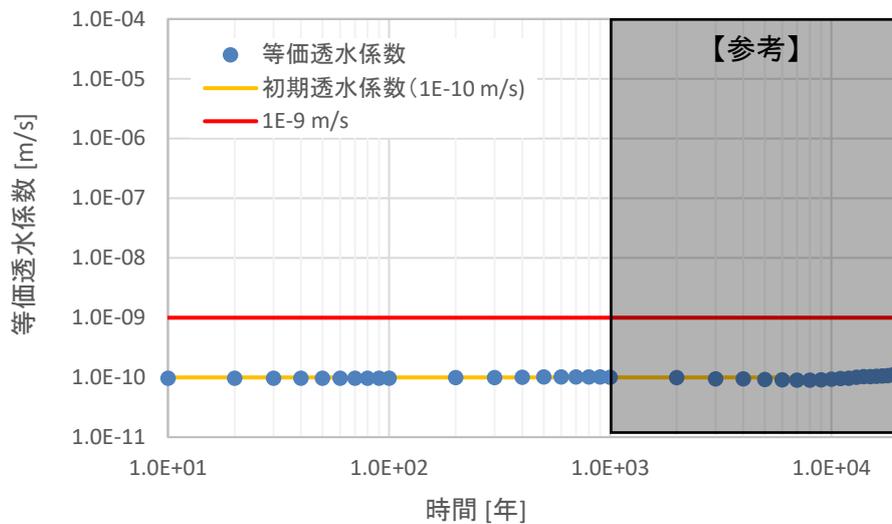


図 4.4-5 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

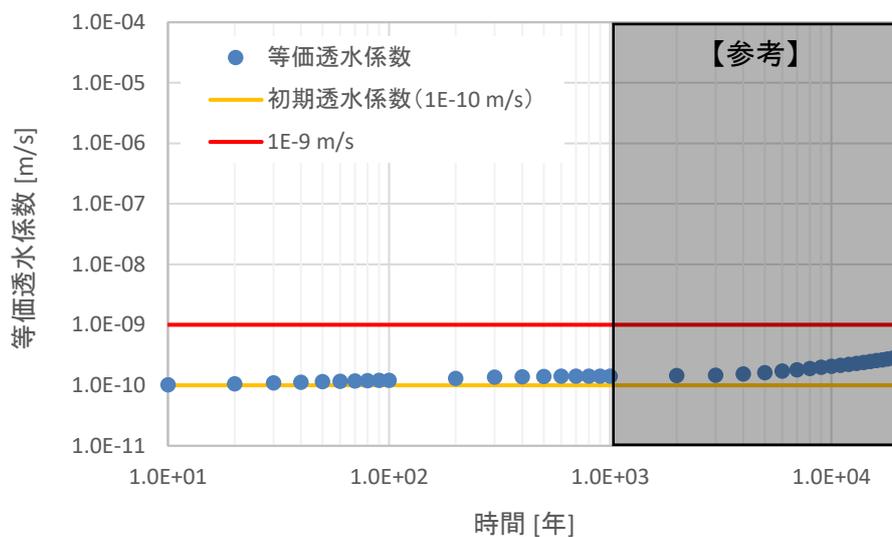
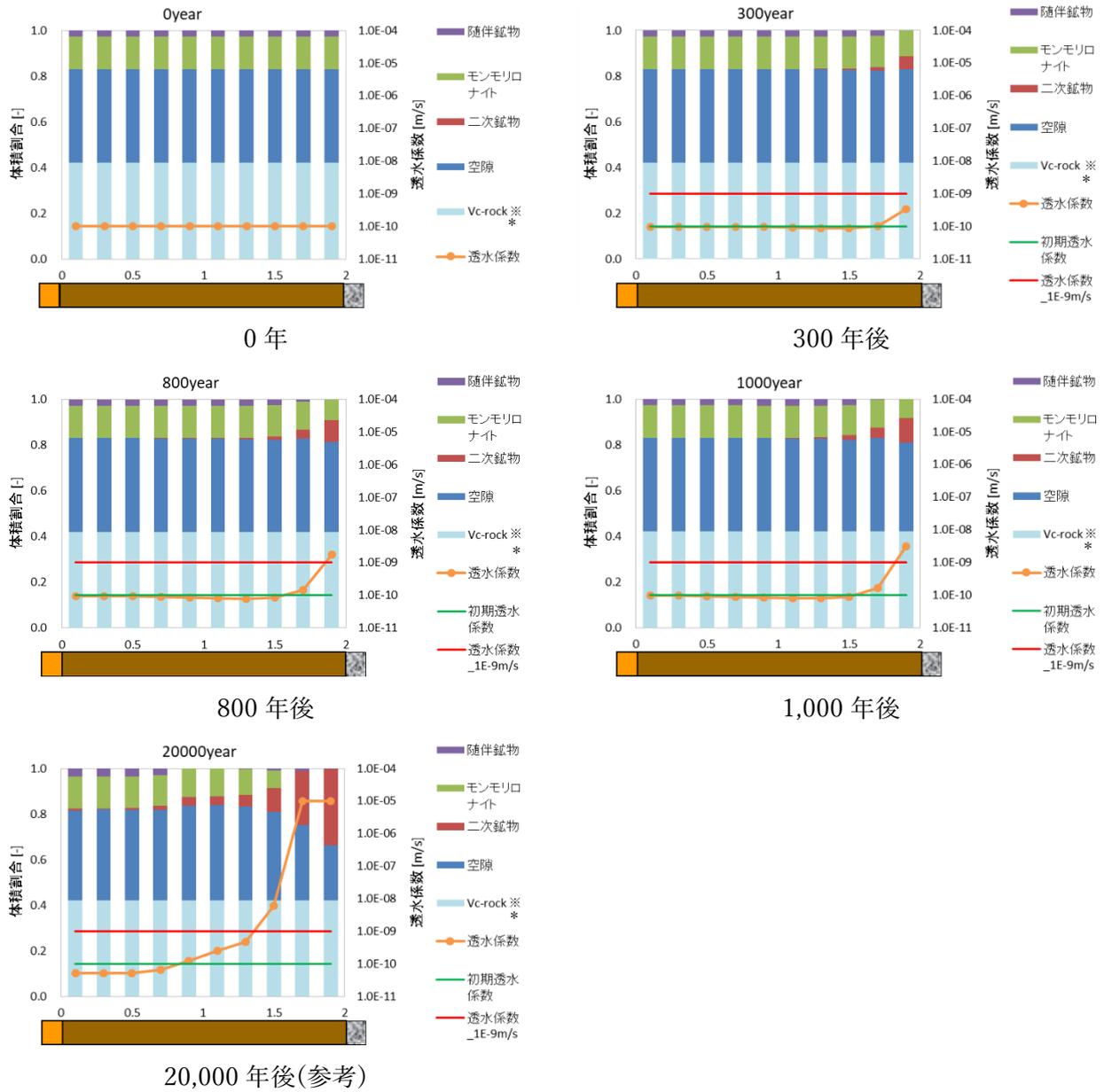
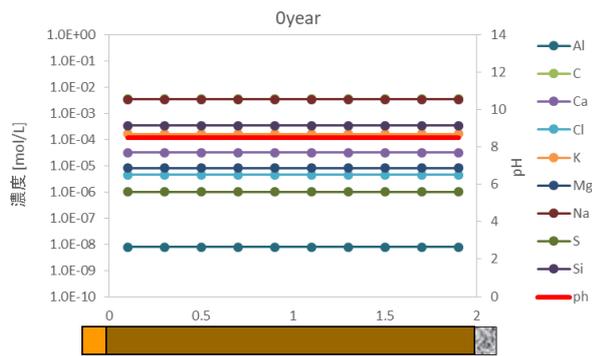


図 4.4-6 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

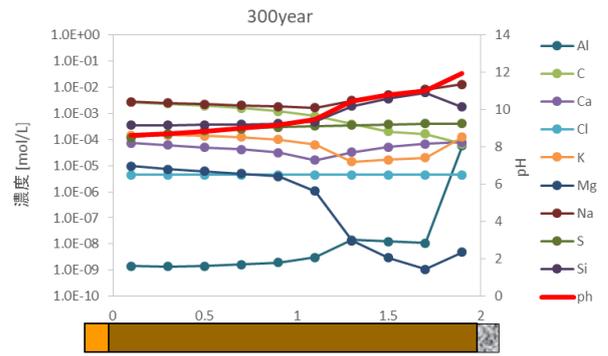


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

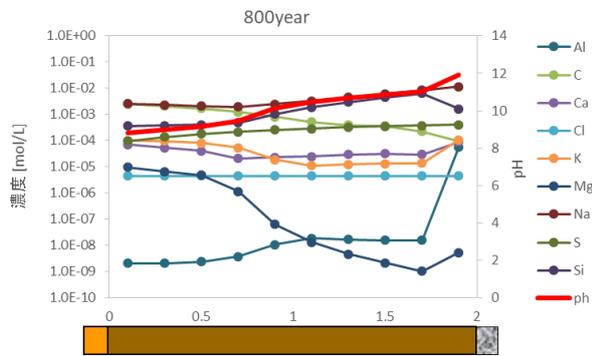
図 4.4-7 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



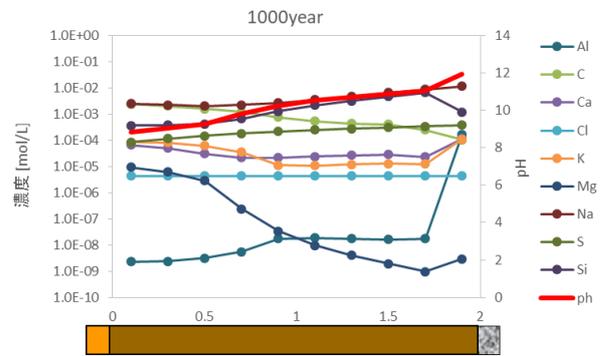
0 年



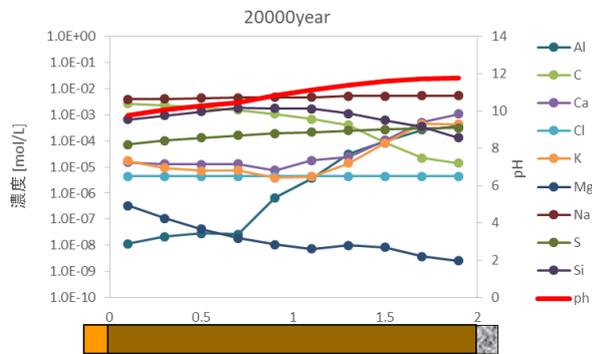
300 年後



800 年後



1,000 年後



20,000 年後(参考)

図 4.4-8 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

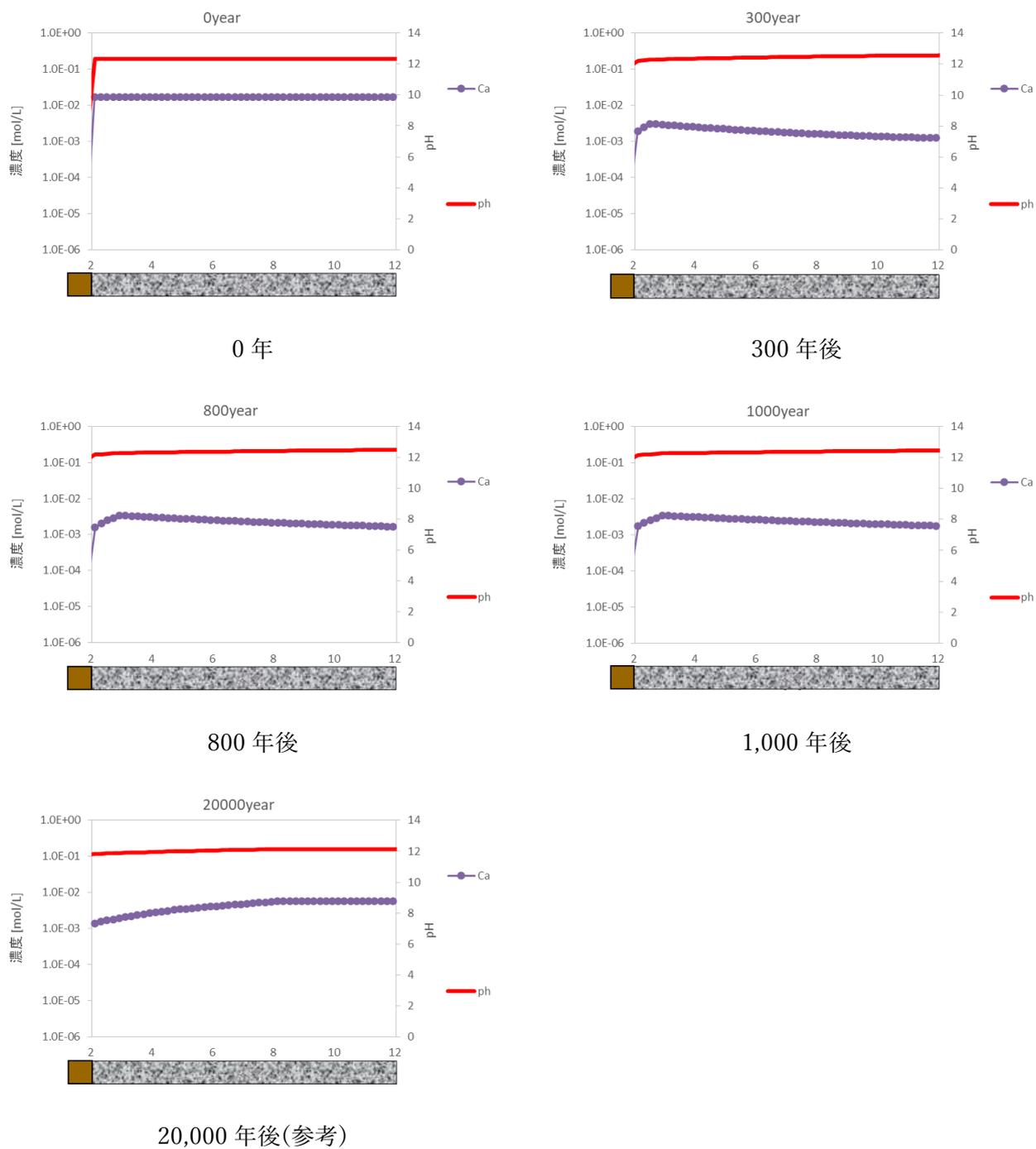


図 4.4-9 3号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca濃度)の分布図
 (ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

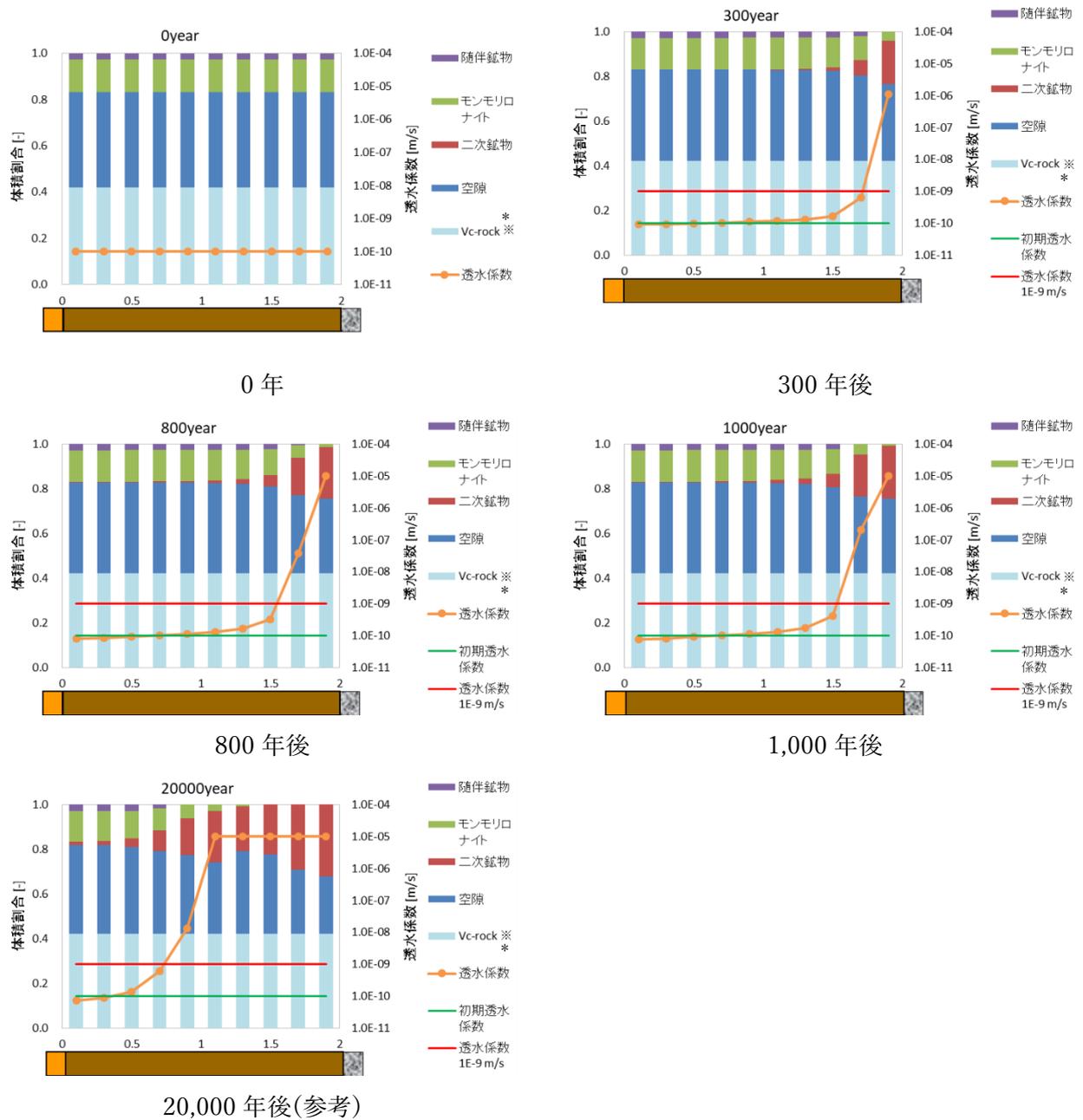
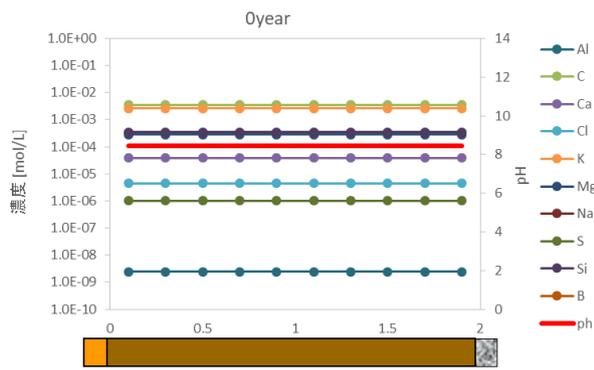
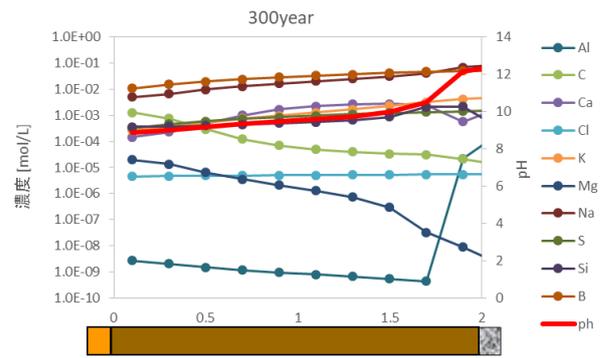


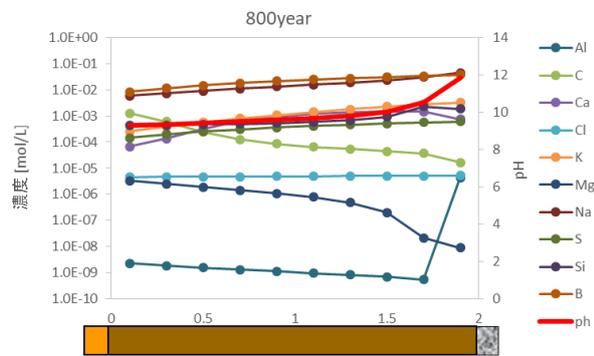
図 4.4-10 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース①: 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



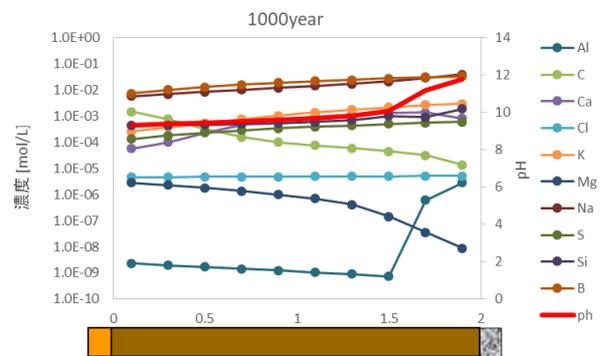
0 年



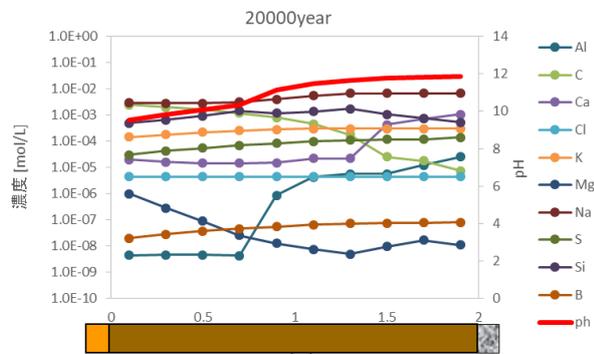
300 年後



800 年後

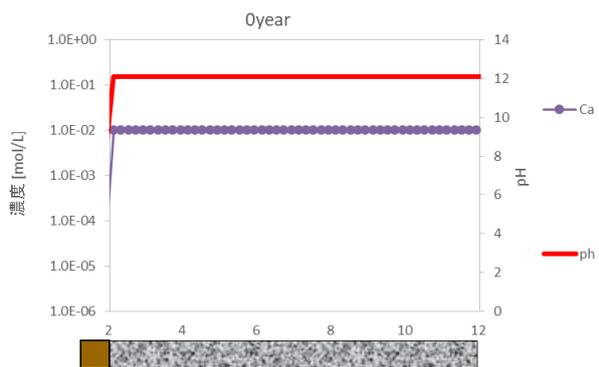


1,000 年後

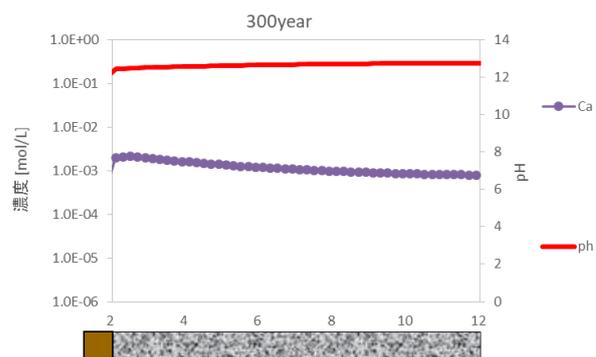


20,000 年後(参考)

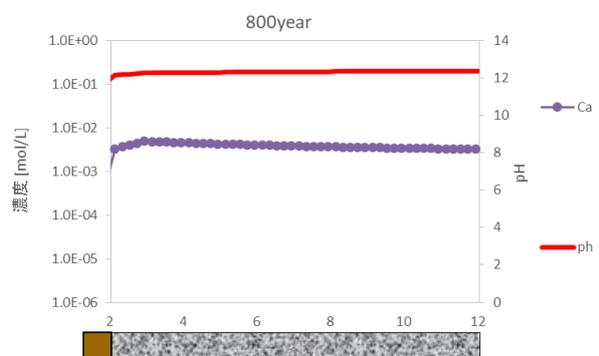
図 4.4-11 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土内の液相組成の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)



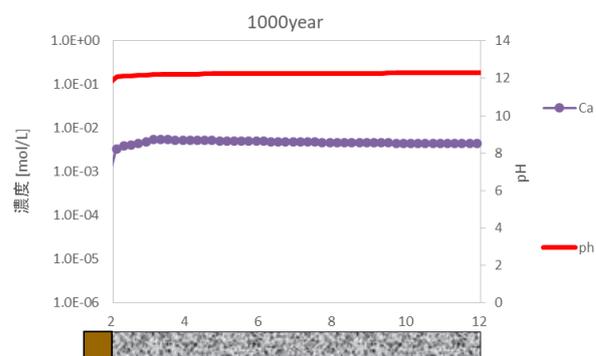
0 年



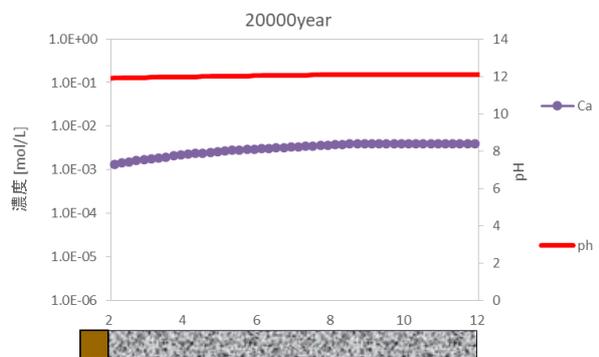
300 年後



800 年後



1,000 年後



20,000 年後(参考)

図 4.4-12 1号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca 濃度)の分布図
(ケース①：難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合)

② 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合（ケース②）

難透水性覆土中の拡散係数モデルについて、モンモリロナイトの割合を 0 とし、単純に空隙率に比例するとしたモデル(数式 4)で、難透水性覆土の等価透水係数の時間変化を解析的に評価した。3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を図 4.4-13 に、1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果を図 4.4-14 に示す。また、3 号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉍物組成と透水係数の分布図を図 4.4-15 に、難透水性覆土内の液相組成分布図を図 4.4-16 に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を図 4.4-17 に示す。1 号廃棄物埋設地においても同様に、難透水性覆土における鉍物組成と透水係数の分布図を図 4.4-18 に、難透水性覆土内の液相組成分布図を図 4.4-19 に、参考として覆土にアルカリ成分を共有する埋設設備内の pH、Ca 濃度分布図を図 4.4-20 に示す。

3 号廃棄物埋設地のベントナイトの変質については、1,000 年後の段階では、「(1) 難透水性覆土中の拡散挙動を現実的なモデルとした場合(ケース①)」と同様、セメント境界近傍ではわずかに変質が見られる程度であった。

1 号廃棄物埋設地の難透水性覆土の等価透水係数は、1,000 年後の段階で初期の透水係数値よりもわずかに高い値となった。

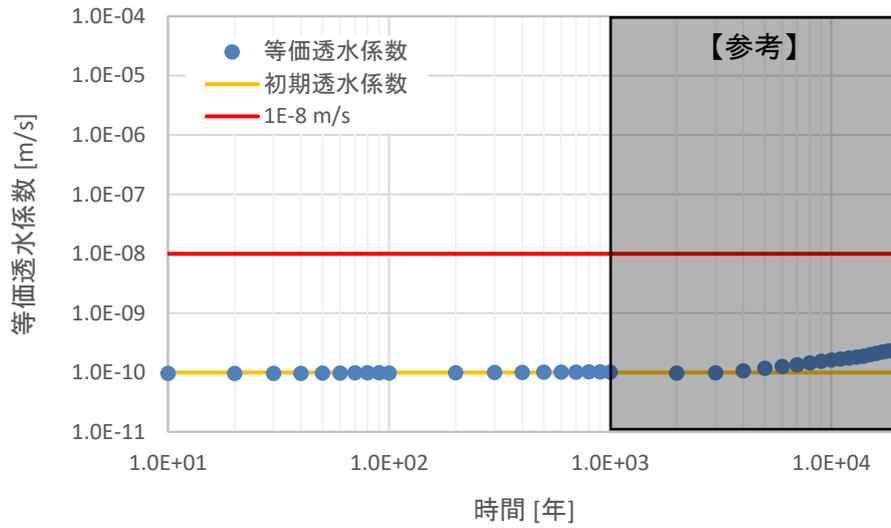


図 4.4-13 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

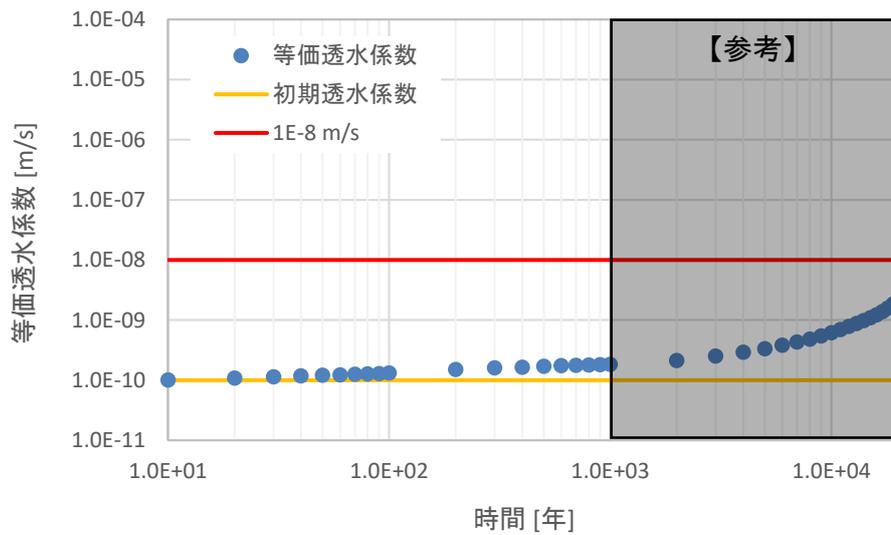
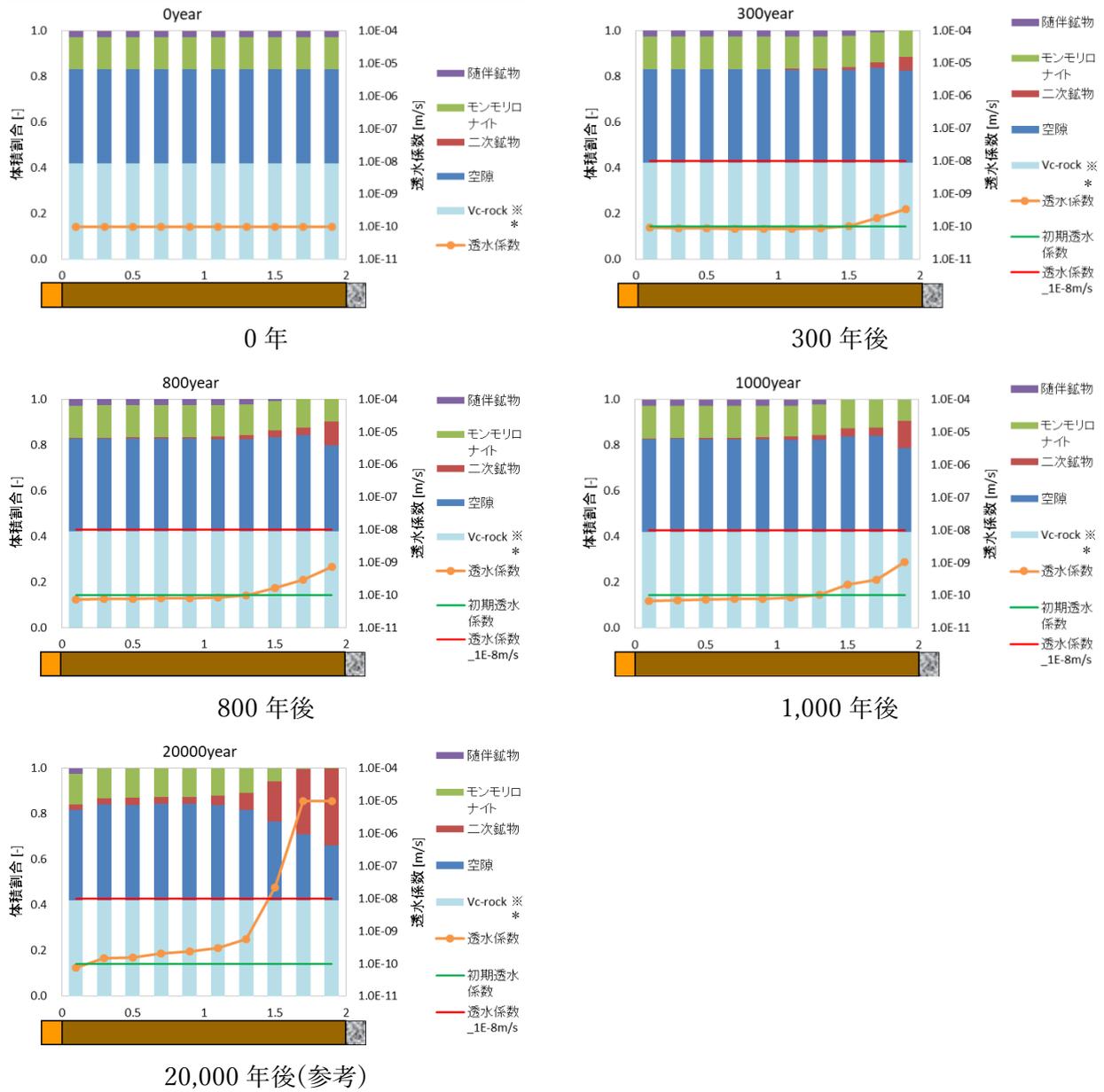
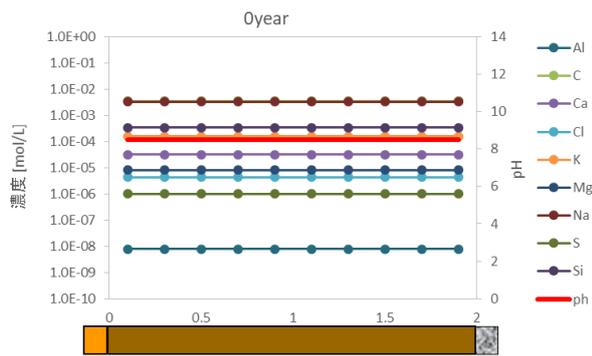


図 4.4-14 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における等価透水係数の時間変化の結果
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

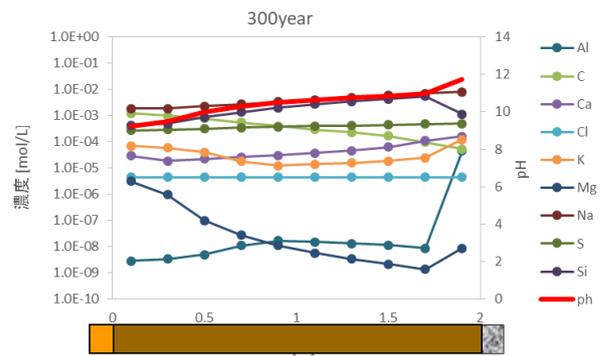


*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

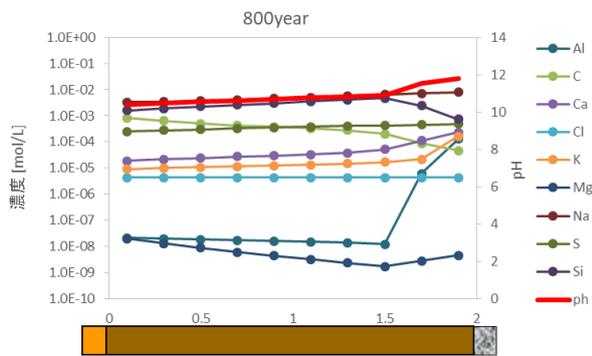
図 4.4-15 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



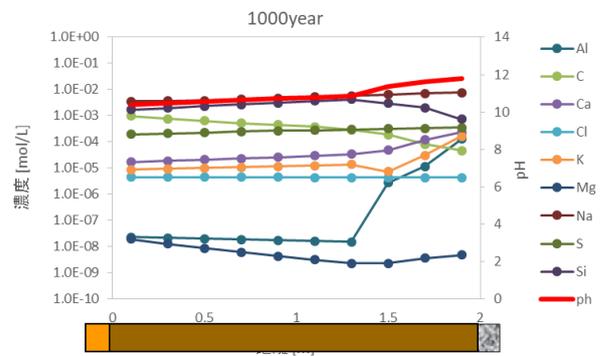
0 年



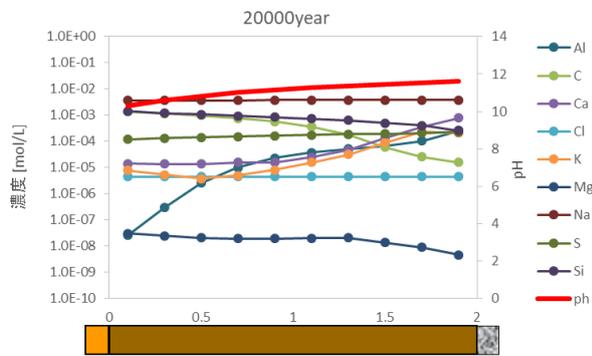
300 年後



800 年後



1,000 年後



20,000 年後(参考)

図 4.4-16 3号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

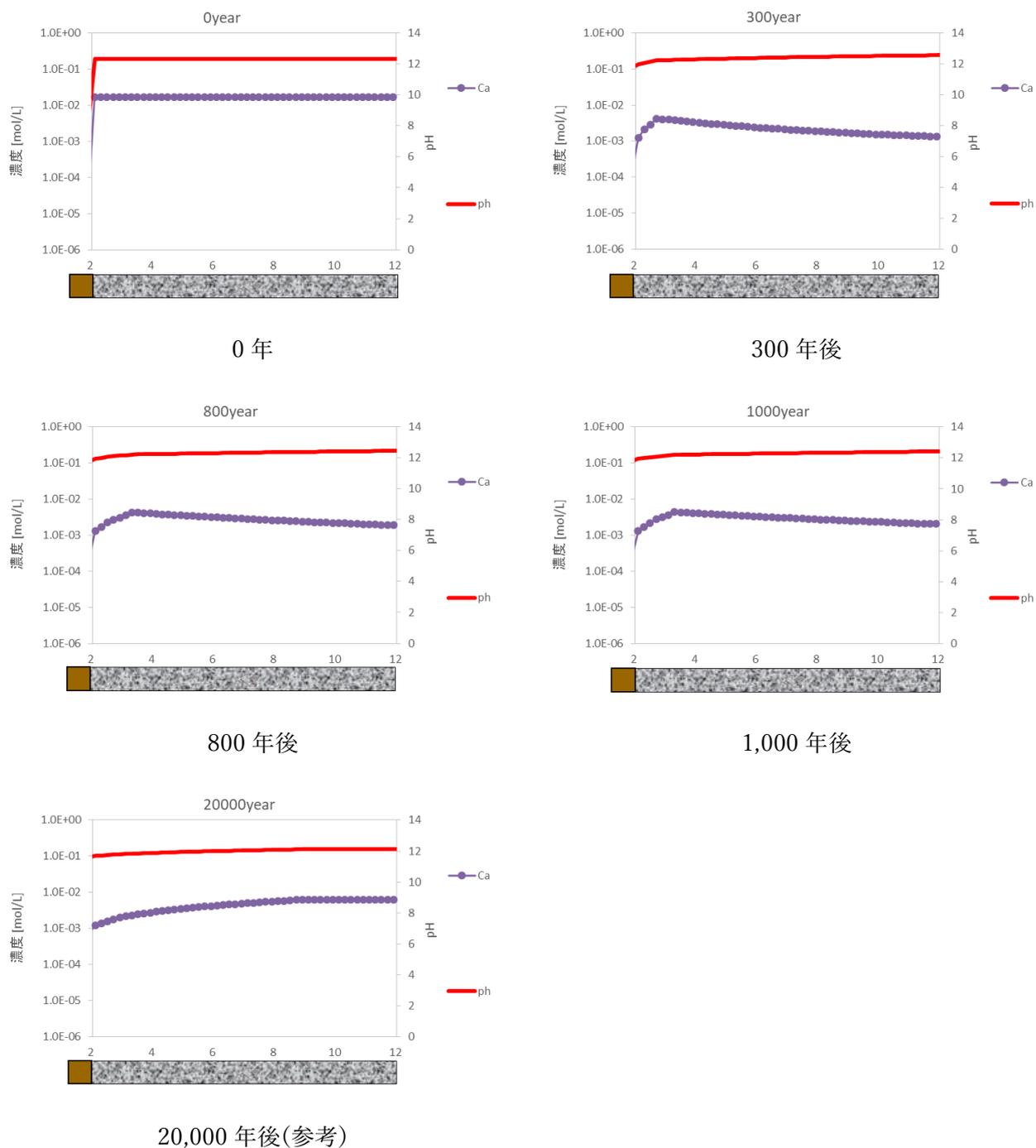
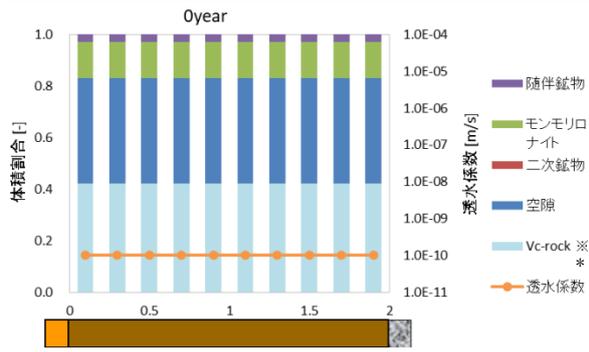
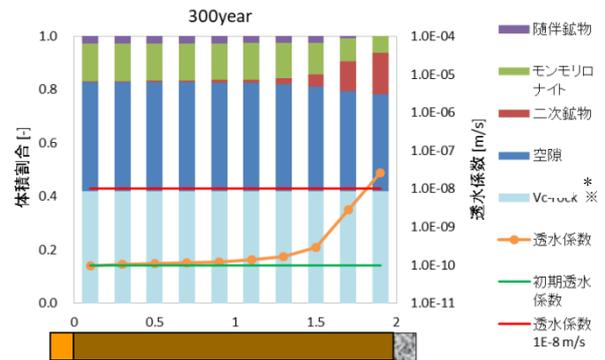


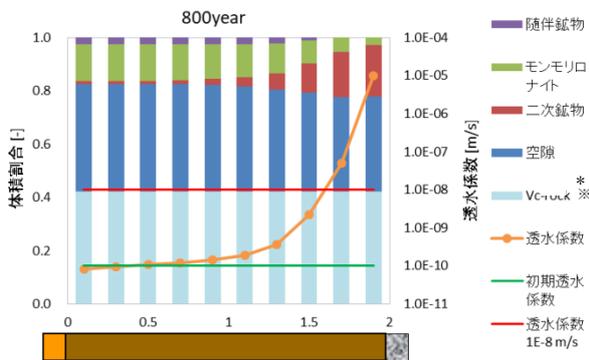
図 4.4-17 3号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca 濃度)の分布図
 (ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



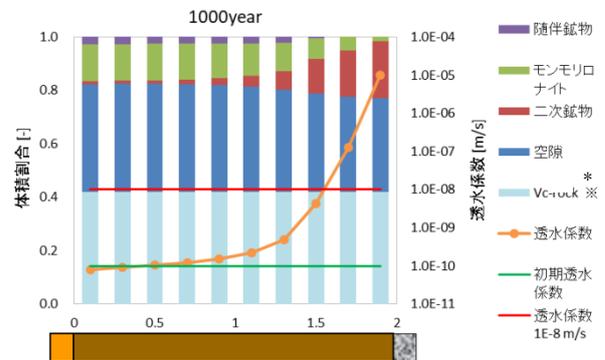
0 年



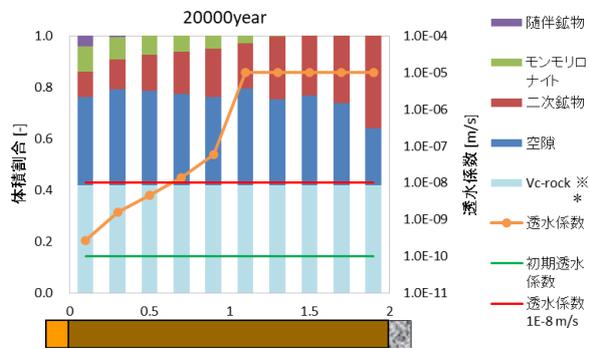
300 年後



800 年後



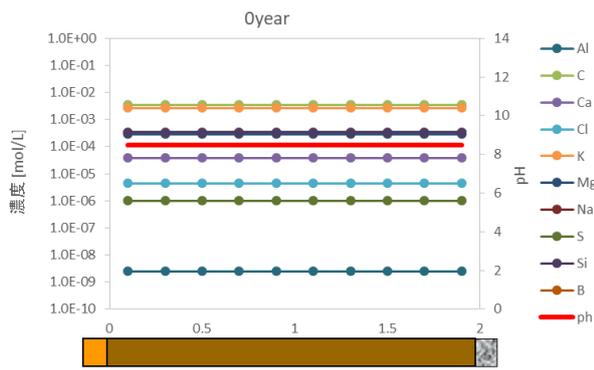
1,000 年後



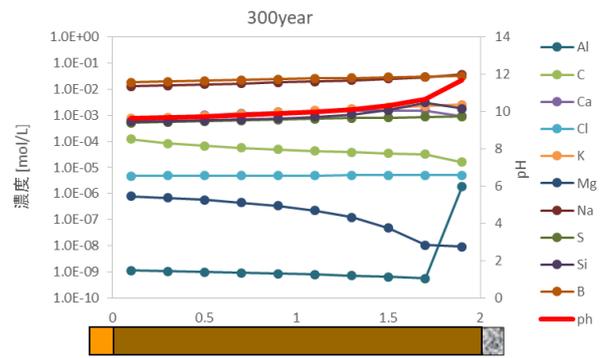
20,000 年後(参考)

*1: Vc-rock: 化学反応に寄与しない固相

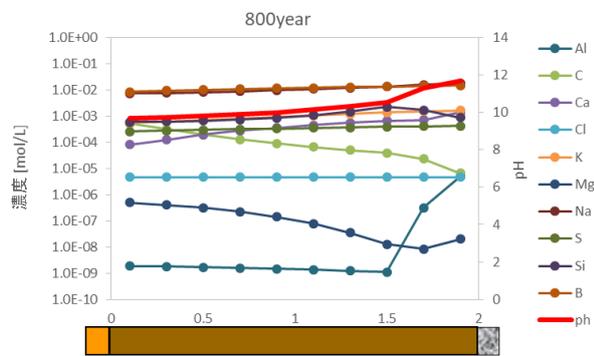
図 4.4-18 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における鉱物組成と透水係数の分布図
(ケース②: 難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



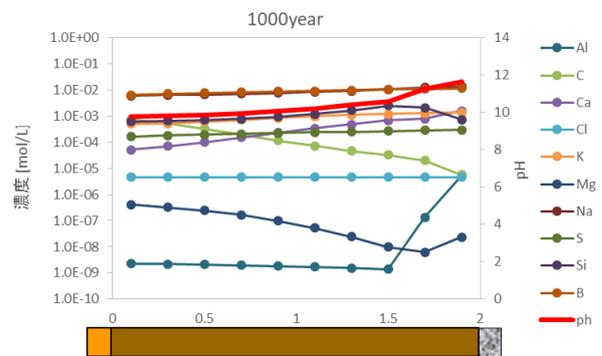
0 年



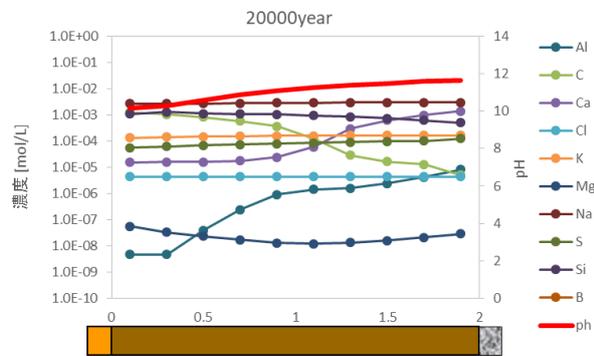
300 年後



800 年後



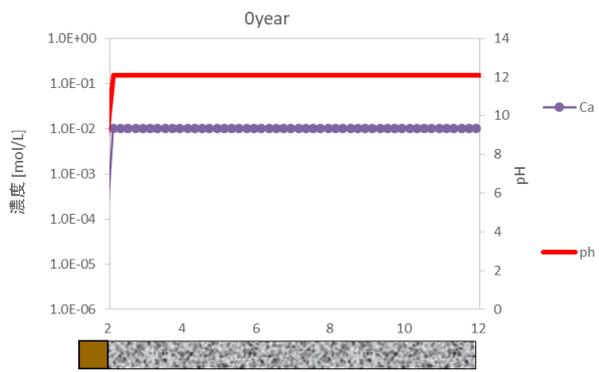
1,000 年後



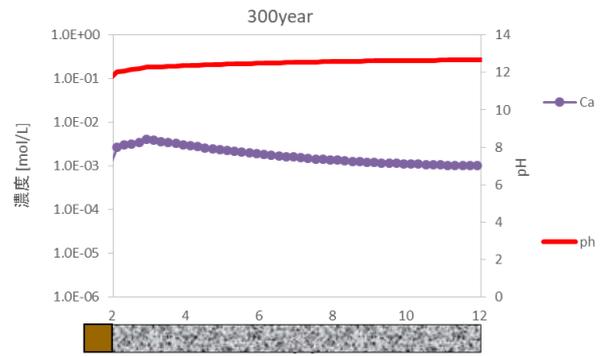
20,000 年後(参考)

図 4.4-19 1号廃棄物埋設地の難透水性覆土における液相組成の分布図

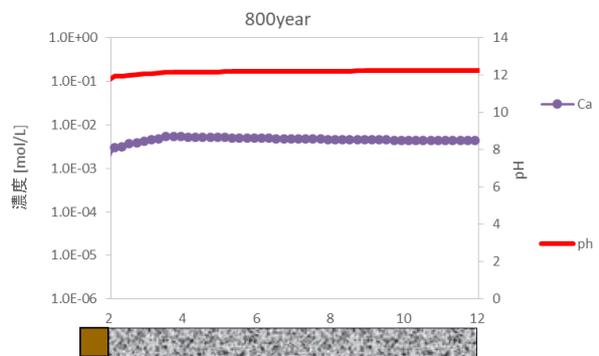
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)



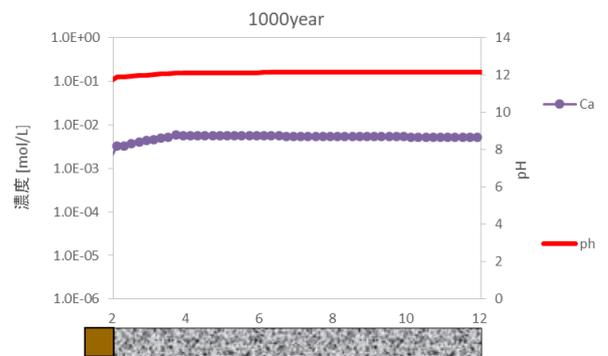
0 年



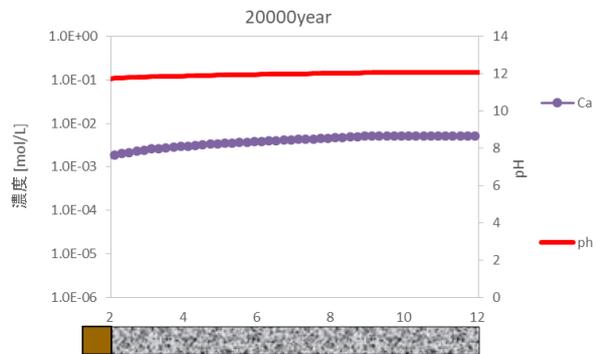
300 年後



800 年後



1,000 年後



20,000 年後(参考)

図 4.4-20 1号廃棄物埋設地の埋設設備内の液相組成(pH、Ca 濃度)の分布図
(ケース②：難透水性覆土中の拡散挙動を単純なモデルとした場合)

(3) 1,000 年後の化学的影響評価

長期的な化学的影響を考慮した難透水性覆土の線量評価上の透水係数は 1,000 年後において下記の値に基づき設定する(表 4.4-8)。

また、化学的影響を受けた場合においても難透水性覆土中のモンモリロナイトが残存することから、難透水性覆土の周囲に設置する下部覆土は、化学的な影響による透水係数の変化は生じないものとする。

表 4.4-8 化学的影響の評価結果

	3号廃棄物埋設地[m/s]		1号廃棄物埋設地[m/s]	
	ケース①※1	ケース②※2	ケース①※1	ケース②※2
0年	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}	1.00×10^{-10}
1,000年後	1.01×10^{-10}	1.02×10^{-10}	1.42×10^{-10}	1.84×10^{-10}

※1：難透水性覆土中の拡散係数モデルを空隙率とモンモリロナイトの含有割合を関数とする経験式(数式3)とする現実的な設定とした場合

※2：難透水性覆土中の拡散係数モデルを、モンモリロナイトの割合を 0 とし単純に空隙率に比例するという単純な設定(数式4)とした場合

4.5 廃棄物埋設地の状態設定

4.5.1 状態設定の概要

影響事象分析および状態変化の評価に基づき、廃棄物埋設地の低透水性の長期的な状態変化を設定し、線量評価に用いる覆土の等価透水係数を設定する。状態変化のイメージを図 4.5-1 に示す。

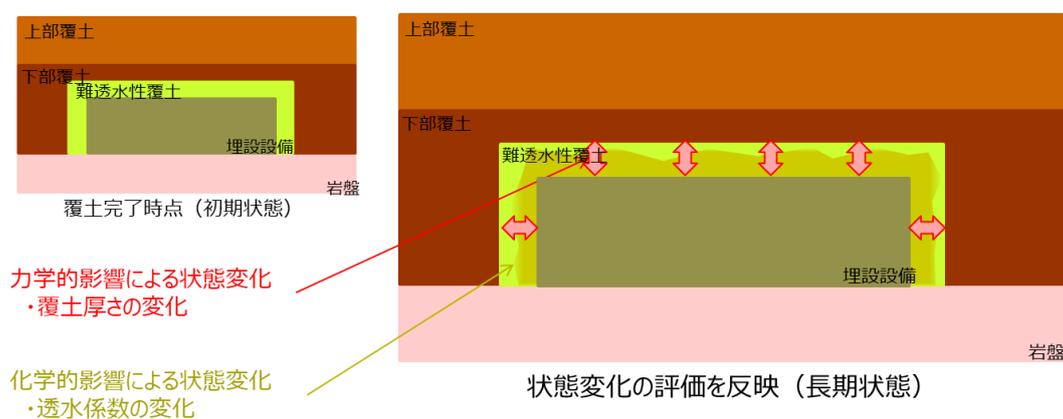


図 4.5-1 状態変化のイメージ

4.5.2 検討手順

状態変化の評価により推定される力学的影響に化学的影響を重畳させ、劣化度合いが大きい埋設設備上面の覆土を対象として、透水係数が同程度となる等価透水係数を算出し、線量評価時の覆土の透水係数とする。

(1) 力学的影響について

力学的影響により各覆土の透水係数が変化しないと設定する。また、化学的影響であるモンモリロナイトの溶解については、微粒分の変質現象であり、力学的変形特性に影響は小さいものと考えられる。よって、力学的影響単独における覆土の変形（覆土厚さの変化）に着目して状態設定を行う。

(2) 化学的影響について

化学的影響により各覆土の透水係数が増加すると設定する。また、力学的影響においては透水係数が変化しないため、覆土内のアルカリ供給量に起因する化学的変質に対して、影響はないものと考えられる。よって、化学的影響単独における透水係数の変化に着目し

て状態設定を行う。

なお、下部覆土が埋設設備と直接的に接する箇所については、鉛直方向に弱部の経路が出来る様に保守的に劣化領域を設定する。

4.5.3 等価透水係数の設定

移行抑制機能を期待する難透水性覆土および下部覆土の線量評価に用いる透水係数を下表に示す。ベントナイトを20%~30%程度混合した覆土を想定して、線量評価上の等価透水係数として設定した。

表 4.5-1 線量評価に用いる透水係数

1号廃棄物埋設施設	
項目	移行抑制機能を期待する 難透水性覆土及び下部覆土の透水係数
確からしい設定	$4 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 相当
厳しい設定	$5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 相当
2号廃棄物埋設施設	
項目	移行抑制機能を期待する 難透水性覆土及び下部覆土の透水係数
確からしい設定	$1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 相当
厳しい設定	$3 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 相当
3号廃棄物埋設施設	
項目	移行抑制機能を期待する 難透水性覆土及び下部覆土の透水係数
確からしい設定	$1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 相当
厳しい設定	$2 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 相当

4.6 線量評価

4.6.1 線量評価に至るまでのフロー

廃棄物埋設地の状態設定を行った以降は、線量評価パラメータ設定に続き線量評価を実施する。線量評価に至るまでのフローを図 4.6-1 に示す。

線量評価の結果によって、評価基準値を満足しない場合は、必要に応じて設計にフィードバックを行い、設計のやり直しを行う。

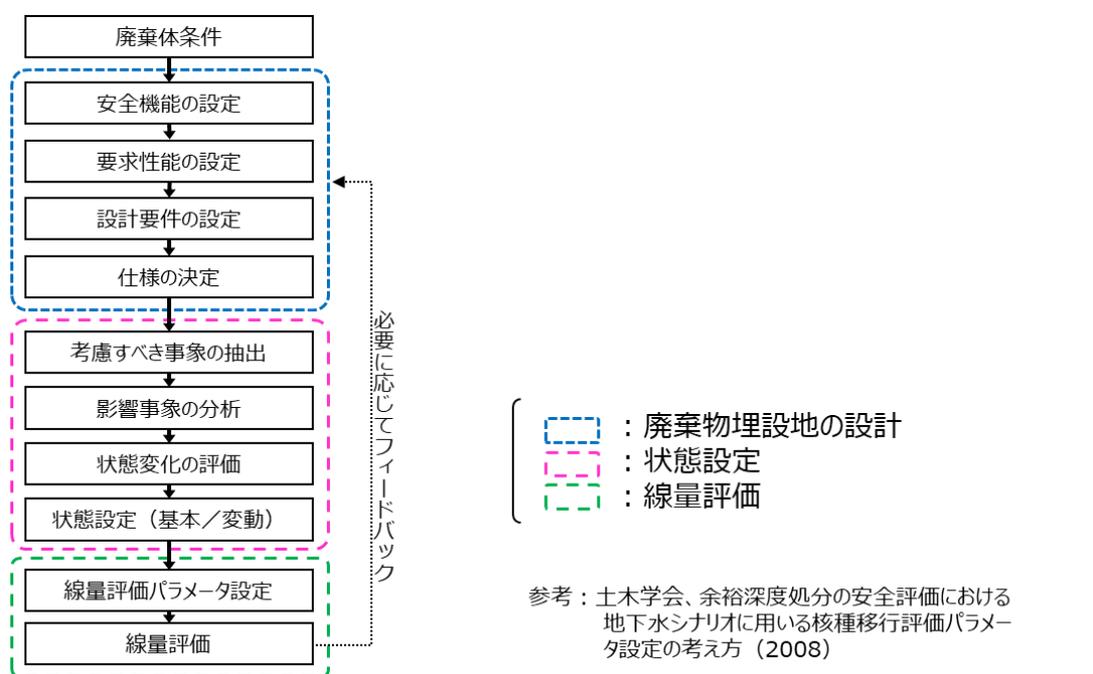


図 4.6-1 線量評価に至るまでのフロー

4.6.2 線量評価結果

算出されたトータル線量のピークは約 $3.3 \mu\text{Sv/y}$ であり、評価基準値である $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回ることから、基本設計が長期的な安全性を確保できることを確認した（技術上の基準に適合）。

線量評価結果のグラフを図 4.6-2 に示す。

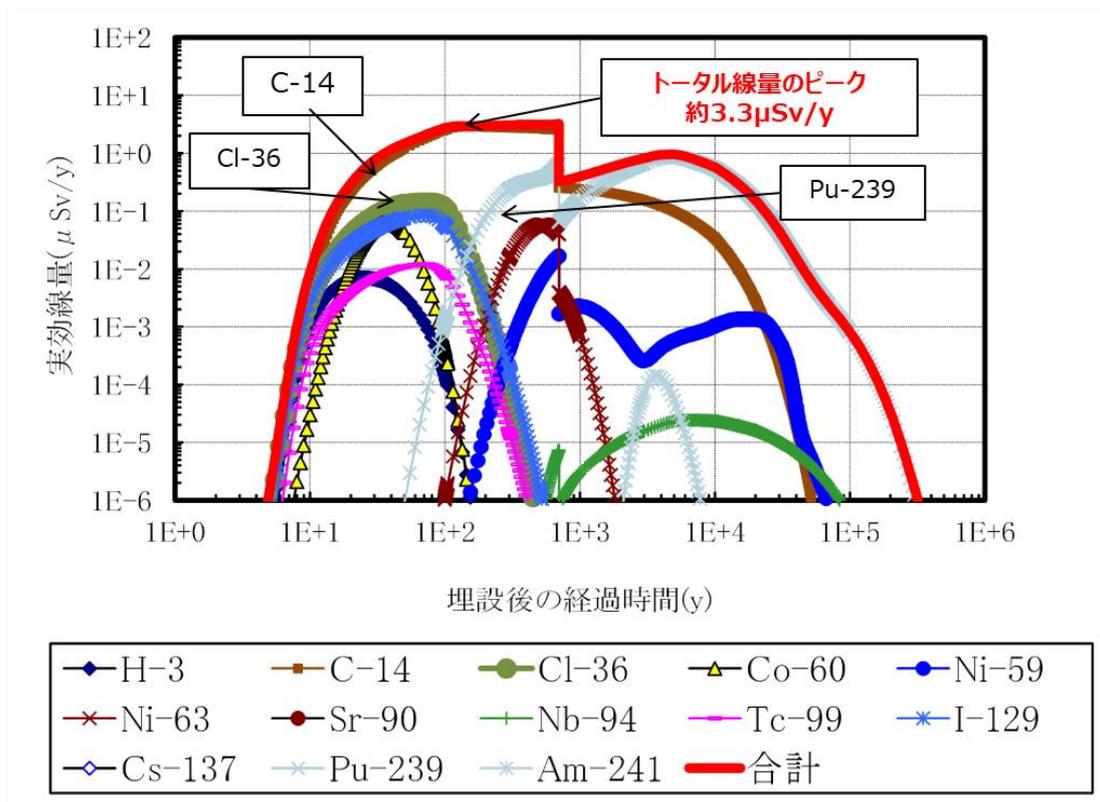


図 4.6-2 線量評価結果

第5章 覆土の詳細設計

5.1 概説

難透水性覆土、下部覆土および上部覆土の仕様を設定するために、覆土の設計検討を実施し、放射性廃棄物の処分における各覆土の要求性能を満足する使用（材料、配合）を設定した。

5.2 設計検討

5.2.1 難透水性覆土

(1) 要求性能と主な仕様

難透水性覆土に要求される性能は第 3 章に示した通りであり、主な仕様は以下の通り。

- ・ 材料 ベントナイト混合土
- ・ 透水係数（施工時点）：巨視的透水係数として $1 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下
- ・ 厚さ 2m 以上
- ・ 密度 $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上

※ 上記の透水特性（低透水性）および放射線の遮蔽性能（遮蔽性）に加えて長期機能維持特性（化学的安定性、変形追従性、液状化抵抗性）についても性能を満たす見通しがあることを得る必要がある。

(2) 検討ケース

試験に使用する供試体の仕様は、表 5.2-1 に示す通りとした。これは、2018 年度（ベントナイト材料調査・試験）の際に取得した各材料の締固め試験結果に基づき設定している。各材料の締固め試験結果を図 5.2-1 および図 5.2-2 に示す。

表 5.2-1 難透水性覆土の供試体仕様

Case	ベントナイト	Be 率 (%)	設定含水比	設定密度 C 値	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)
Case-KV	クニボンド	30	$\omega_{opt}+4\%$	97	19.3	1.678
Case-KB	クニゲル V1	20	ω_{opt}	95	8.8	1.948
Case-CaKV	Ca 型化クニゲル V1	20	ω_{opt}	95	8.8	1.948

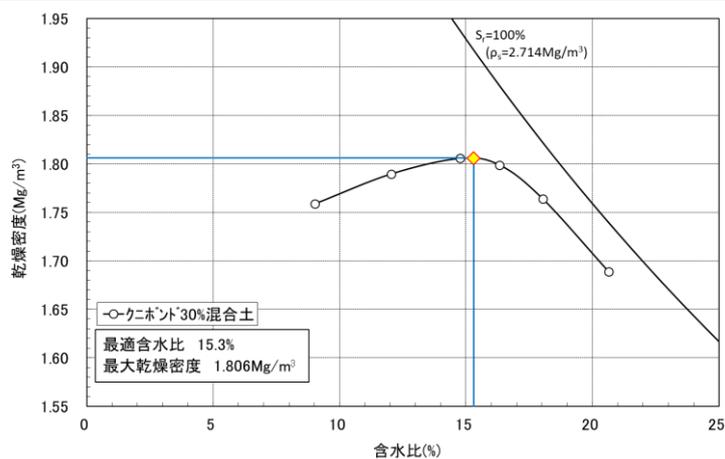


図 5.2-1 クニボンド 30%混合土の締固め試験結果（2018 年度）

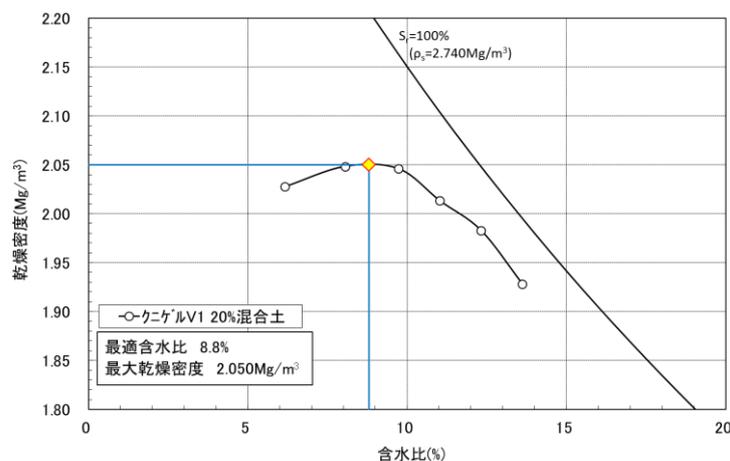


図 5.2-2 クニゲル V1 20%混合土の締固め試験結果（2018 年度）

(3) 試験結果

① 透水試験

透水試験の供試体の寸法は直径 60mm、高さ 60mm とし、各材料 2 試験を実施した。試験結果を表 5.2-2 に示す。なお、各試験ケースの結果は図 5.2-3～図 5.2-8 に示す通りである。今回の試験では、事前の水浸脱気等を行わなかった。低動水勾配により飽和促進を行ったが、供試体の透水性（浸潤速度）に応じて動水勾配を上昇させた。動水勾配の設定はクニボンド混合土で最大 30 程度、クニゲル V1 混合土で最大 100 程度まで上昇させた。Ca 型クニゲル V1 混合土は透水性が高かったため、動水勾配の最大値は 3 程度とした。また、供試体が飽和し、飽和透水係数が得られるまでの時間も透水性に影響を受け、クニゲル V1 混合土は動水勾配を高くしているものの試験には 100 日以上を要した。

2018 年度に実施した透水試験結果との比較を図 5.2-9 および図 5.2-10 に示す。クニボンド 30%混合土およびクニゲル V1 20%混合土は 2018 年度の結果と整合する結果であった。Ca 型クニゲル V1 混合土の透水係数は、クニゲル V1 混合土の透水係数より 4 オーダー程度高い値となった。

表 5.2-2 難透水性覆土の透水試験結果

Case	ベントナイト	Be 率 (%)	設定		実測値		透水係数 (m/s)
			含水比 (%)	密度;C 値 (Mg/m ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	
1-1	クニボンド	30	$\omega_{opt}+4\%$	97%	19.1	1.678	1.27×10^{-11}
1-2			(19.3%)	(1.678)	19.1	1.678	3.20×10^{-11}
2-1	クニゲル V1	20	ω_{opt}	95%	8.5	1.948	4.49×10^{-12}
2-2			(8.8%)	(1.948)	8.5	1.948	4.40×10^{-12}
3-1	Ca 型化 クニゲル V1	20	ω_{opt}	95%	8.6	1.948	1.80×10^{-08}
3-2			(8.8%)	(1.948)	8.6	1.948	3.21×10^{-08}

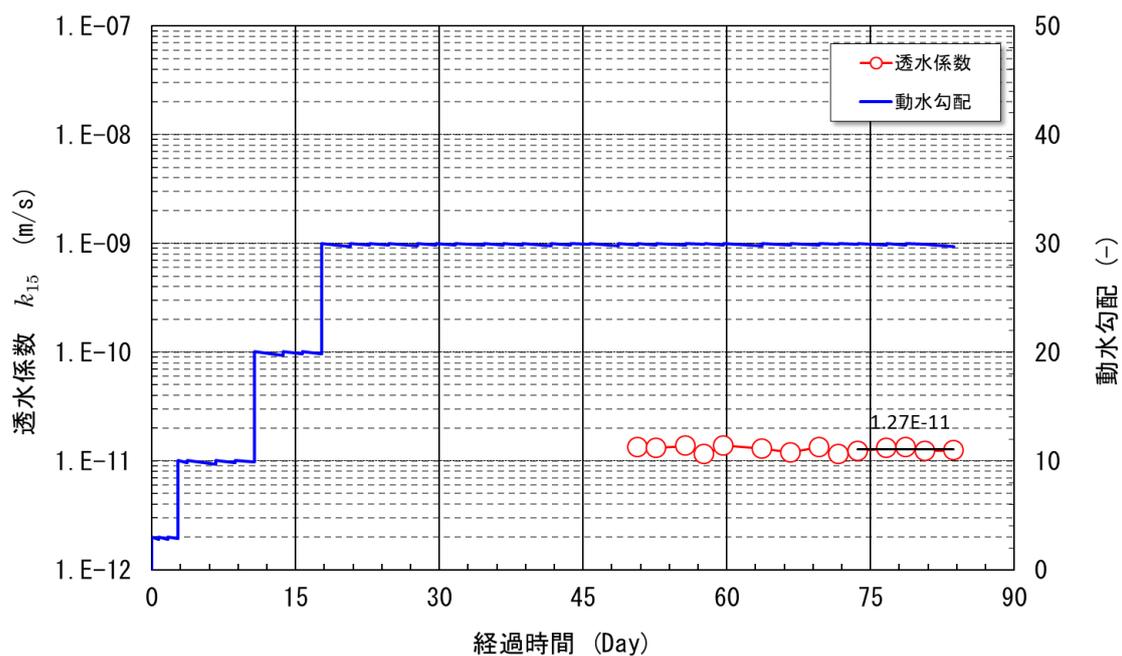


図 5.2-3 透水試験結果 (クニボンド混合土 ; Case1-1)

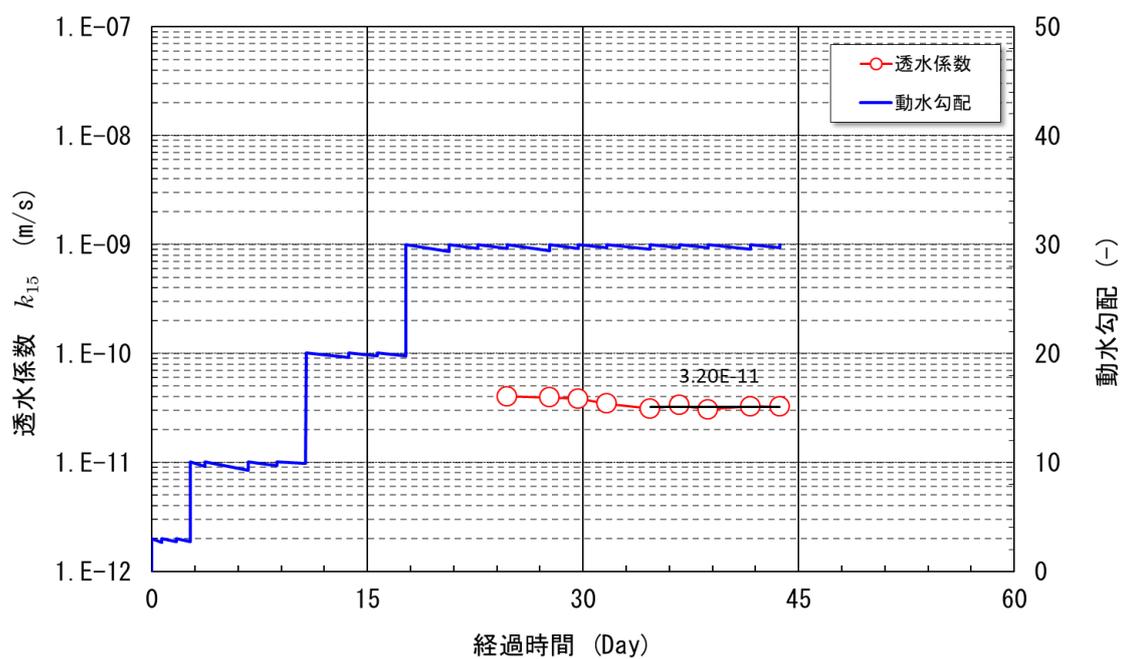


図 5.2-4 透水試験結果 (クニボンド混合土 ; Case1-2)

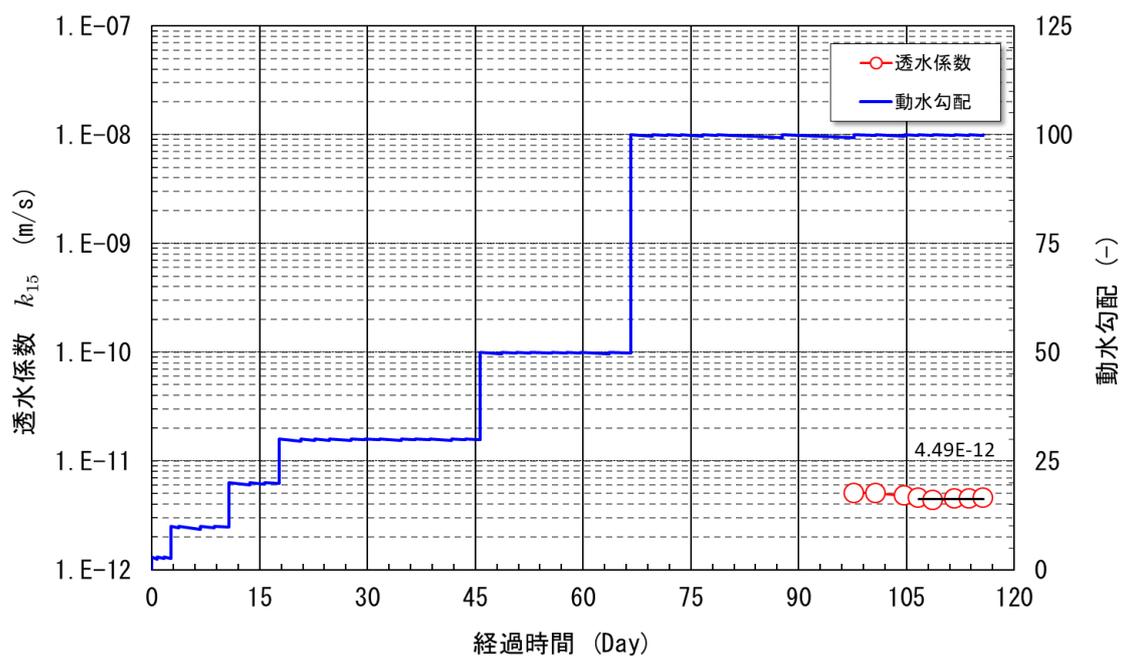


図 5.2-5 透水試験結果 (クニゲル V1 混合土 ; Case2-1)

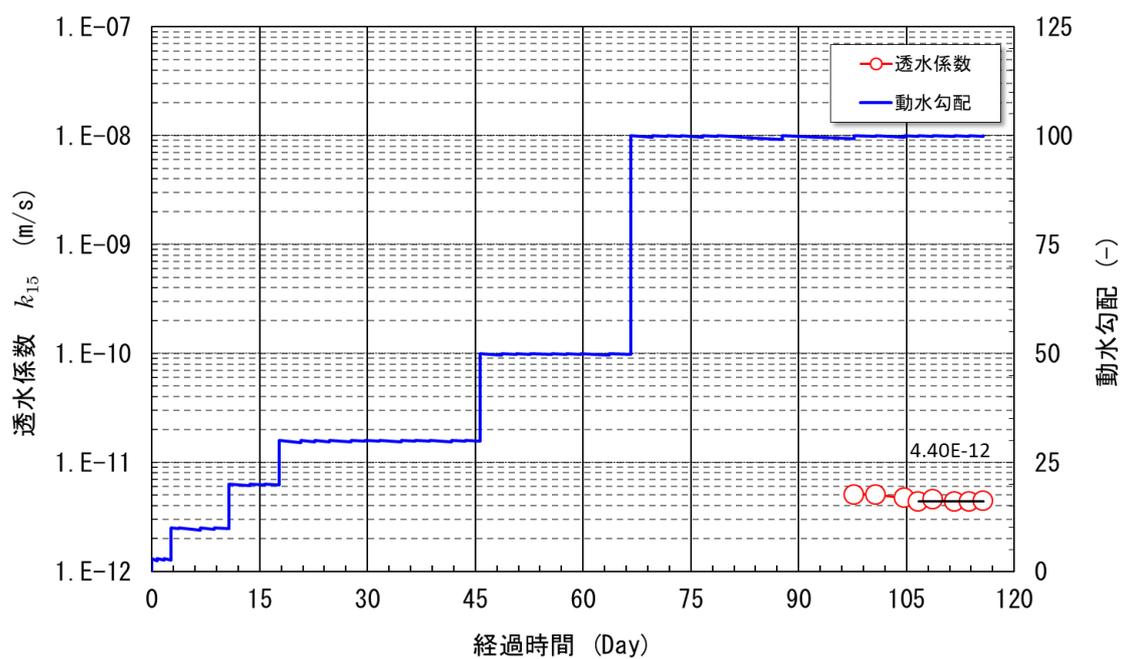


図 5.2-6 透水試験結果 (クニゲル V1 混合土 ; Case2-2)

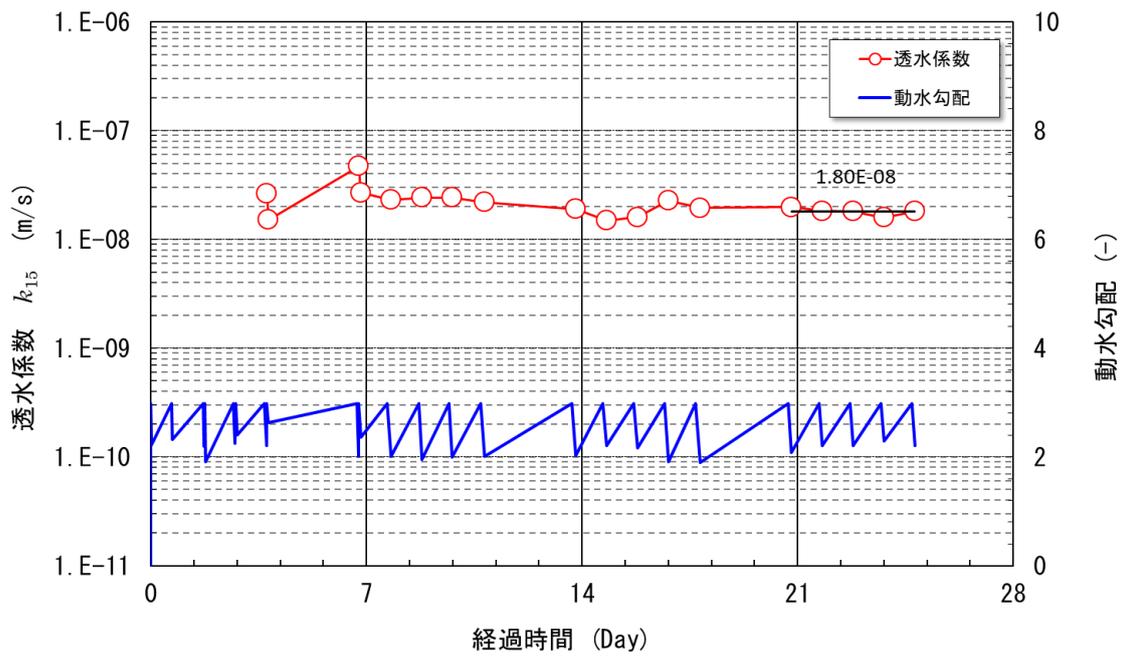


図 5.2-7 透水試験結果 (Ca 型化クニゲル V1 混合土 ; Case3-1)

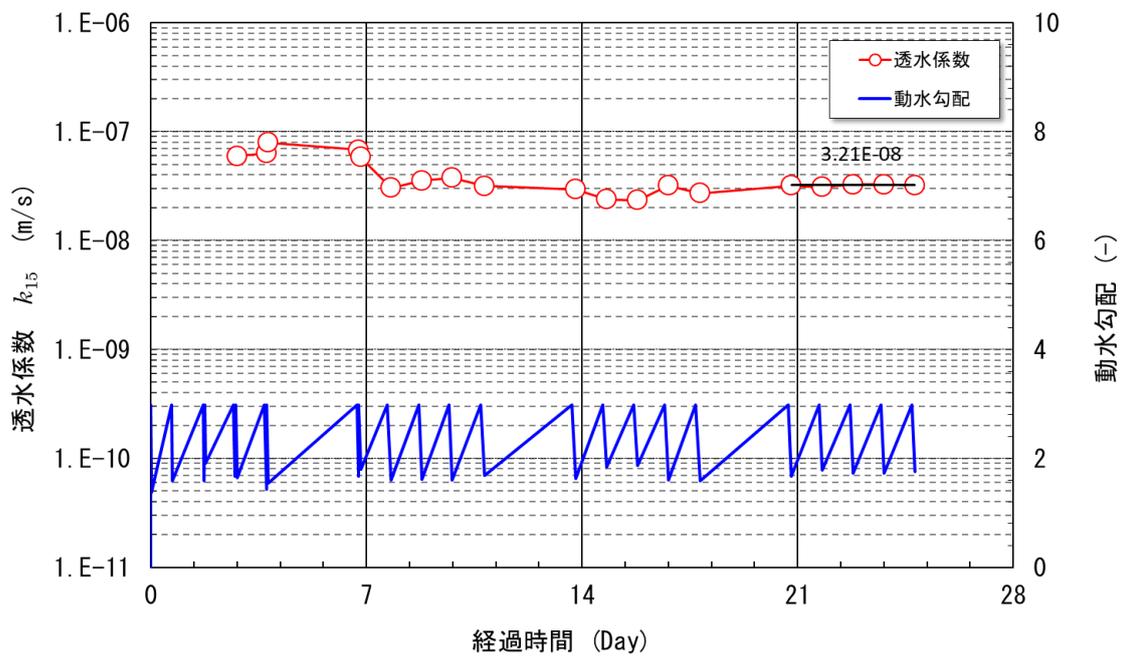


図 5.2-8 透水試験結果 (Ca 型化クニゲル V1 混合土 ; Case3-2)

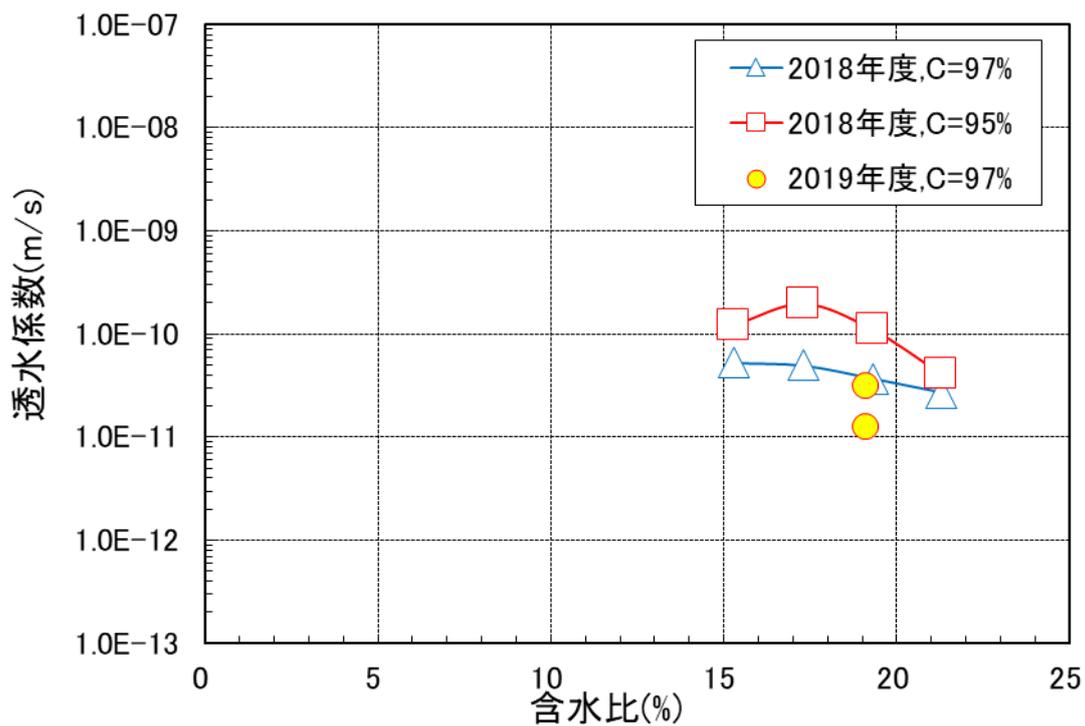


図 5.2-9 クニボンド混合土の透水試験結果

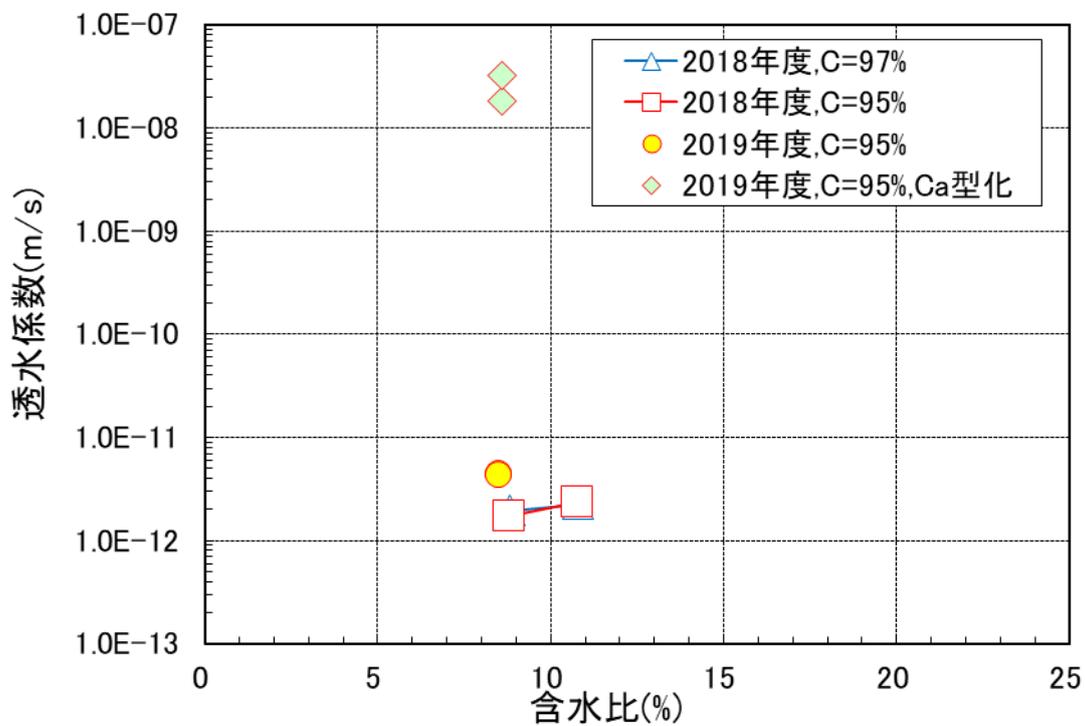


図 5.2-10 クニゲル V1 混合土の透水試験結果

② 三軸透水試験

前節の透水試験は「地盤工学会基準（JGS 0312）低透水性材料の透水試験方法」に基づいて実施したが、比較のために三軸透水試験も実施した。対象はクニゲル V1 混合土とし、供試体の直径は 50mm とし、供試体の長さをパラメータとして試験を実施した。拘束圧は 100kPa とした。試験結果を表 5.2-3 に示す。なお、各試験ケースの結果は図 5.2-11～図 5.2-13 に示す通りである。図 5.2-5 および図 5.2-6 に示す一軸透水試験と比べて、動水勾配を低くしていたため飽和に達するのに時間を要している。また、供試体長が 100mm のケース（Case4-3）に関しては、まだ飽和に達していないと思われ算出透水係数の値は、まだ高い値（不飽和状態での透水係数）であると推察される。得られた透水係数の値を比較した結果を図 5.2-14 に示す。同図には一軸透水試験結果も示している。飽和に達した後の透水係数であると思われる Case4-1 および Case4-2 の値は、一軸透水試験の結果と同程度であった。

表 5.2-3 難透水性覆土の三軸透水試験結果

Case	ペントナイト	Be 率 (%)	設定		実測値		供試体長 (mm)	透水係数 (m/s)
			含水比 (%)	密度;C 値 (Mg/m ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)		
4-1	クニゲル V1	20	ω_{opt} (8.8%)	95% (1.948)	8.5	1.948	20	3.34×10^{-12}
4-2					8.5	1.948	40	3.63×10^{-12}
4-3					8.5	1.948	100	1.02×10^{-11}

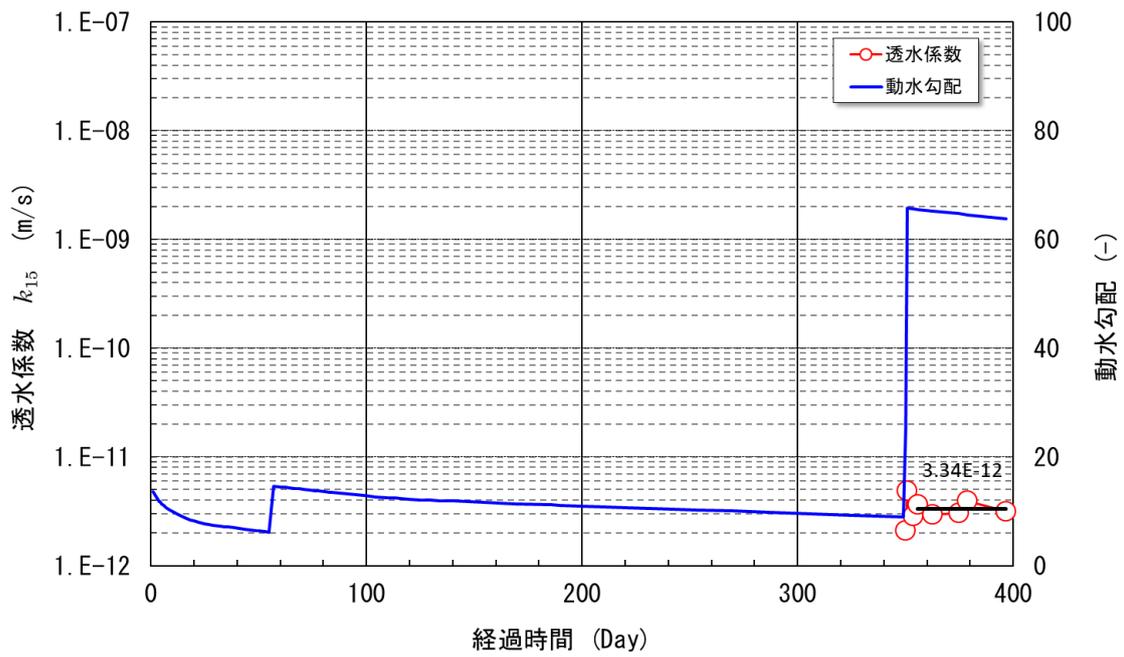


図 5.2-11 三軸透水試験結果 (クニゲル V1 混合土 ; Case4-1、H=20mm)

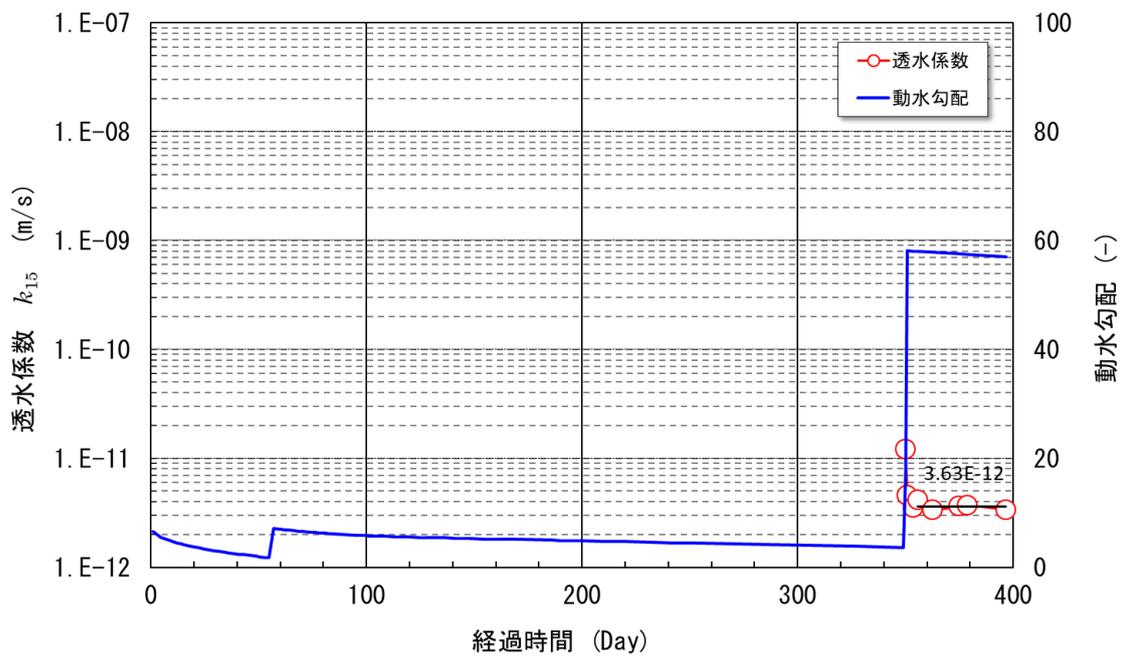


図 5.2-12 三軸透水試験結果 (クニゲル V1 混合土 ; Case4-2、H=40mm)

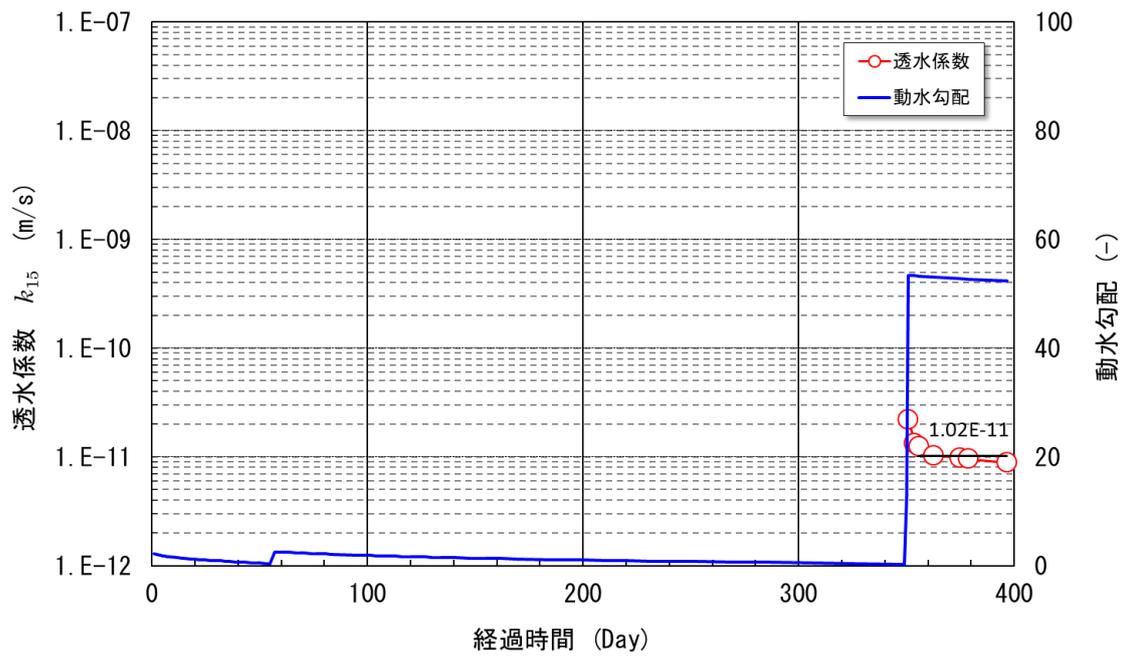


図 5.2-13 三軸透水試験結果 (クニゲル V1 混合土 ; Case4-3、H=100mm)

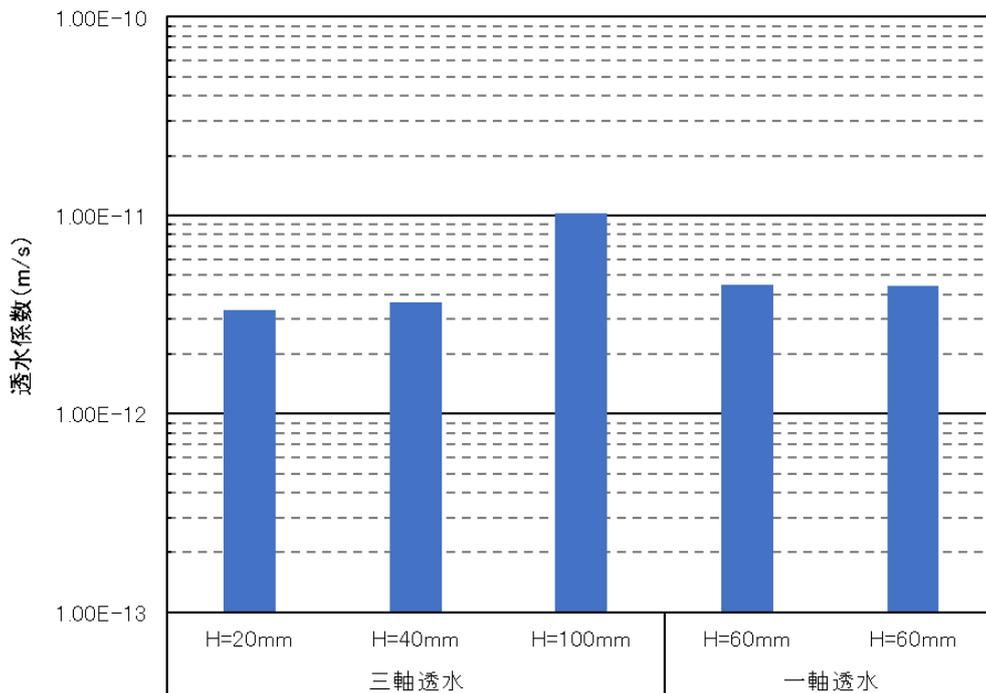


図 5.2-14 透水試験結果の比較

③ 膨潤圧試験

図 5.2-15 に各ベントナイト混合土の膨潤圧試験結果を、このうちクニゲル V1 混合土の膨潤圧試験結果を図 5.2-16 に示す。各混合土との 2 試験を実施した。2 試験で多少のばらつきがある混合土もあるが、膨潤圧としては、クニゲル V1 混合土が最も高い膨潤圧を示した。130～160kPa 程度である。また、透水性が他の混合土に比べて低いため、膨潤圧が定常になるのに時間を要している。クニボンド混合土の膨潤圧は 120～130kPa 程度であり、Ca 型化クニゲル V1 混合土は、ほとんど膨潤圧は発生しないという結果であった。図 5.2-16 は、クニゲル V1 混合土に対して、① ω_{opt} (8.8%)、C 値=97% (1.989Mg/m³)、② $\omega_{opt}+2\%$ (10.8%)、C 値=97% (1.957Mg/m³)、③ ω_{opt} (8.8%)、C 値=95% (1.948Mg/m³)、④ $\omega_{opt}+2\%$ (10.8%)、C 値=95% (1.917Mg/m³) の 4 ケースに対して、それぞれ 2 試験の計 8 試験を実施した結果である。同じ仕様の 2 試験でも結果のばらつきがみられるが、上記の仕様の範囲で発生する膨潤圧は 120～180kPa の範囲であった。

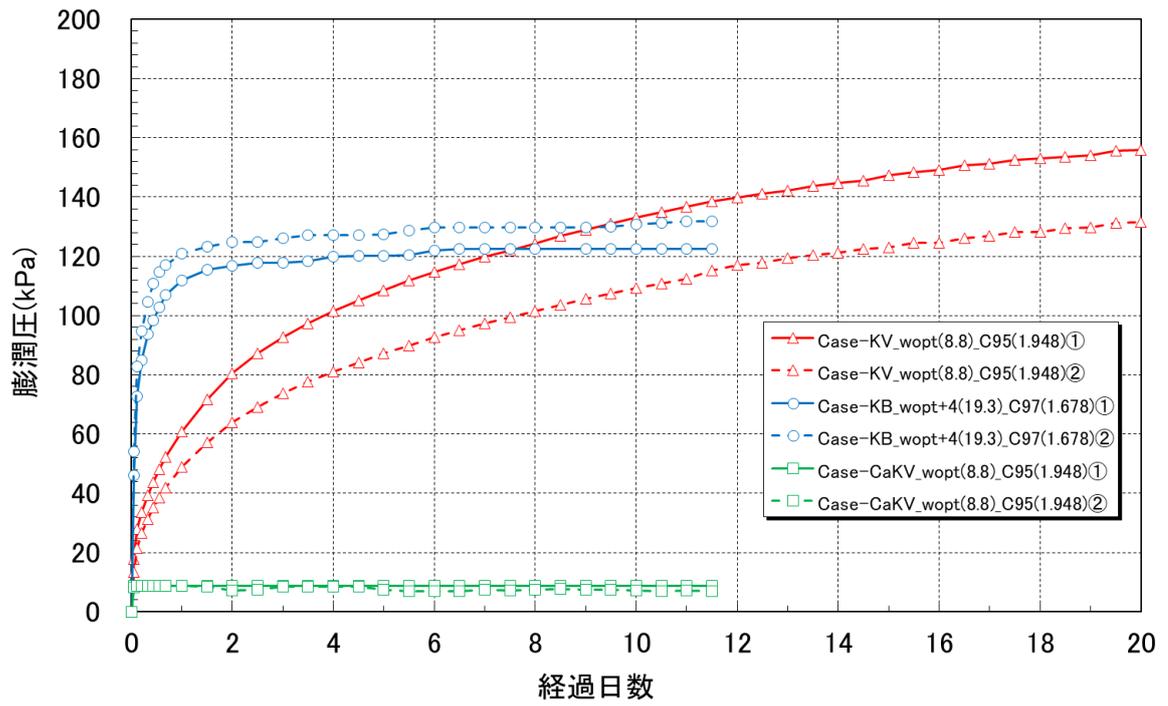


図 5.2-15 各ベントナイト混合土の膨潤圧試験結果

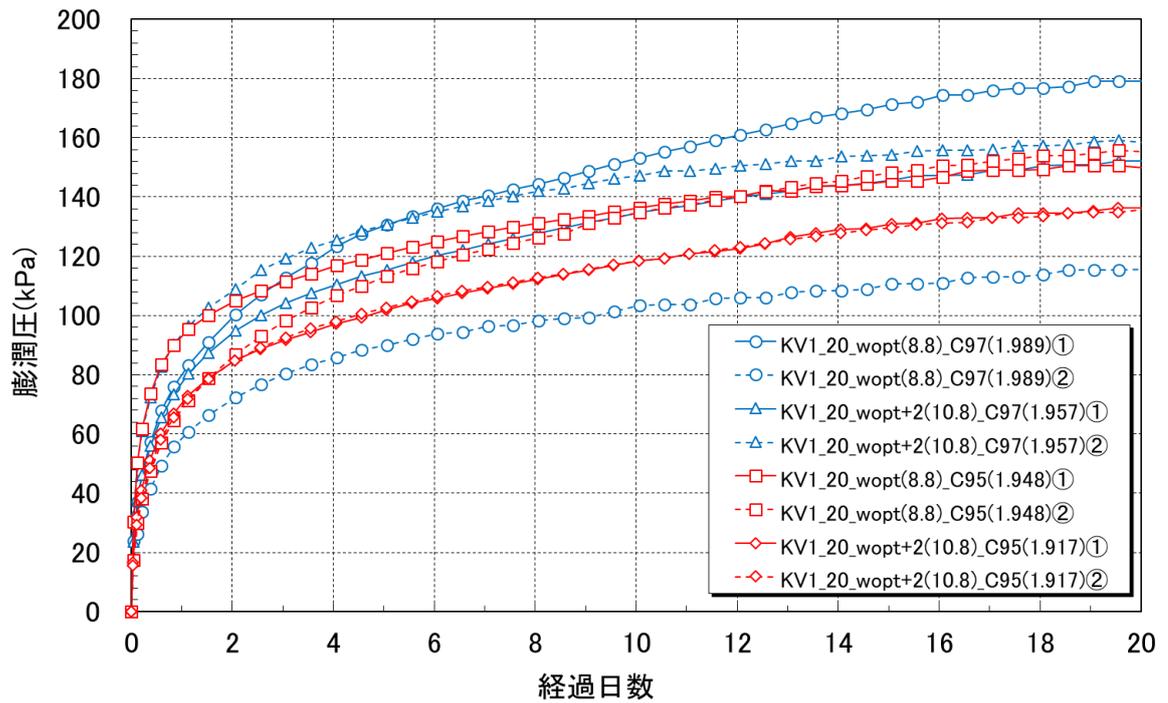


図 5.2-16 クニゲル V1 混合土の膨潤圧試験結果

④ 膨潤変形試験

図 5.2-17 および図 5.2-18 に、各ベントナイト混合土の膨潤変形試験結果を示す。図 5.2-17 は膨潤変形量、図 5.2-18 は膨潤変形率である。拘束圧は 100kPa である。クニゲル V1 混合土の膨潤変形率も小さいが 2.5%程度は変形が生じている。一方、クニボンド混合土の膨潤変形率は 1%弱と小さく、Ca 型化クニゲル V1 混合土に関しては、ほぼ膨潤変形しないという結果であった。

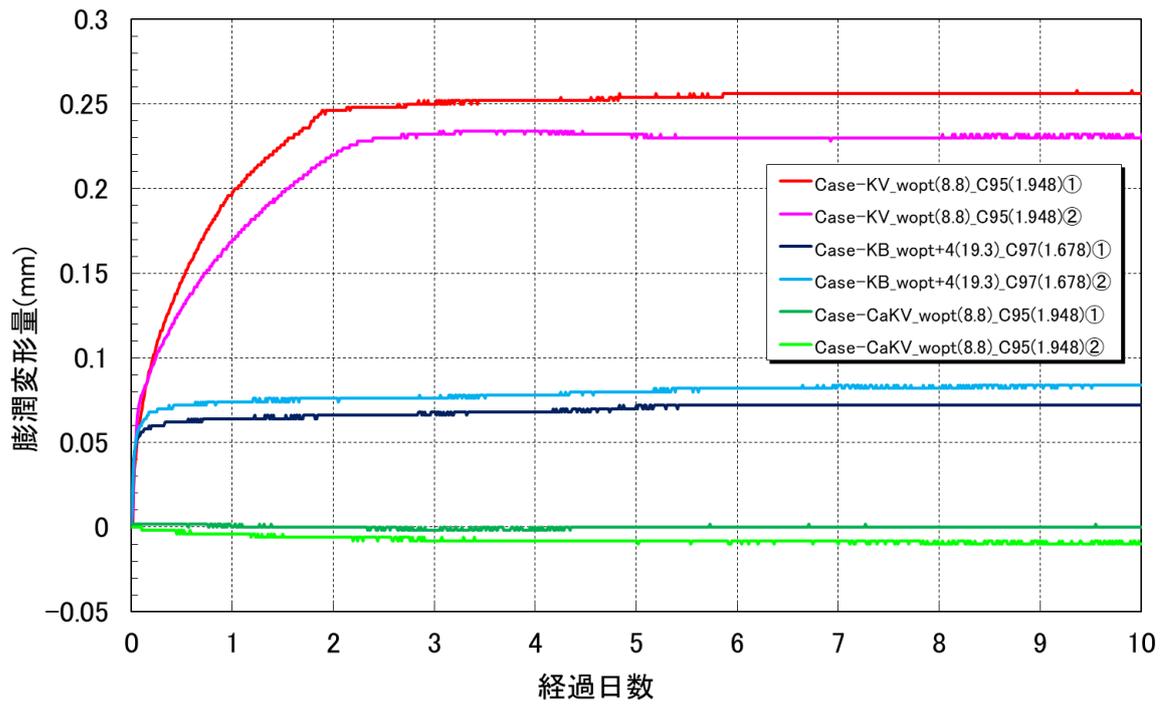


図 5.2-17 各ベントナイト混合土の膨潤変形試験結果（膨潤変形量）

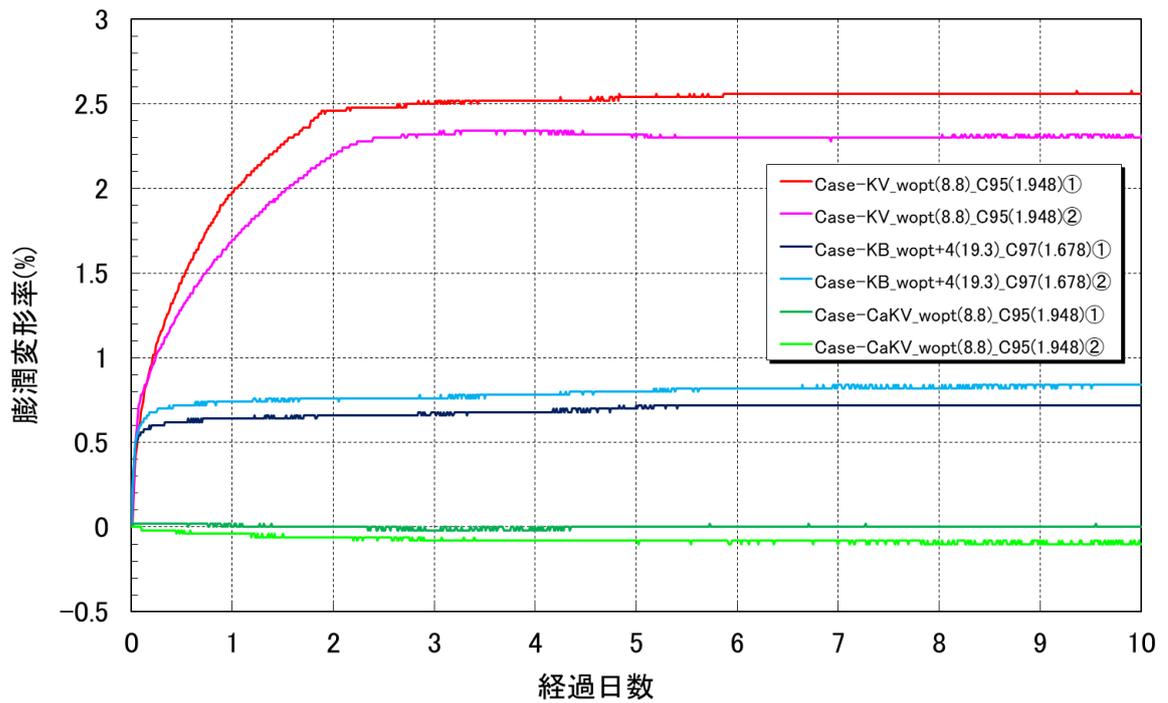


図 5.2-18 各ベントナイト混合土の膨潤変形試験結果（膨潤変形率）

⑤ 圧密試験

圧密試験の供試体の寸法は直径 60mm、高さ 20mm として試験を実施した。三種類の混合土を用いて試験した結果のうち、 e - $\log P$ 曲線を図 5.2-19～図 5.2-22 に、 C_v - $\log P$ 曲線を図 5.2-23 に、 m_v - $\log P$ 曲線を図 5.2-24 にそれぞれ示す。

図 5.2-19～図 5.2-22 に示した e - $\log P$ 曲線は各載荷段階後の供試体の高さより求められる間隙比の推移を示す。すなわち、圧密圧力載荷後にどの程度まで供試体が縮んだか（除荷過程では膨張したか）を表す。間隙比の分布範囲が広ければそれだけ圧縮性・膨張性に富む材料であるといえる。クニボンド混合土はベントナイトの混合率が 30% であるため、 e - $\log P$ 曲線の分布範囲が間隙比の軸方向に広く、粘土であるベントナイトの影響が他の二つの混合土よりも大きい。クニゲル V1 混合土と Ca 型化クニゲル V1 混合土はベントナイトの混合率が 20% であるため、間隙比の軸方向の分布幅が狭く変形量が少ないことがわかる。特に Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 を用いた混合土では、除荷過程の変形量、すなわち膨潤量の影響で間隙比 e の回復が見込まれたが、混合率が少ないため通常の粘性土と同様な除荷過程の挙動を示した。今回の試験結果の場合、間隙比 e は $e=0.26 \Rightarrow e=0.29$ 程度であった。このクニゲル V1 を Ca 型化した Ca 型化クニゲル V1 混合土の変形量は圧縮過程で大きく、除荷過程では同程度の膨張量を示した（間隙比 e で $e=0.25 \Rightarrow e=0.27$ 程度）。

C_v は収束までの時間の目安となる。すなわちこの値が大きければ収束までの時間が短いといえる。図 5.2-23 に示した C_v - $\log P$ 曲線は三種類の混合土の間で大きな差異は認められない結果となった。また、相対的に荷重が小さいほど C_v は小さく、収束までの時間が長いことを示す。

m_v は、土の圧密特性の指標の一つであり、土が圧密によってどれほど収縮するかを表わす。 m_v が大きい土は、圧密による地盤沈下量が大きく、 m_v が小さければ、圧密による地盤沈下量は小さい。 m_v は、弾性係数の逆数である。圧縮指数 C_c 、膨張指数 C_s と同様に最終的な沈下量の予測に用いられるが、本報告では除荷段階における膨張についても体積圧縮係数 m_v を求める計算方法を適用した。図 5.2-24 に示した m_v - $\log P$ 曲線では、載荷段階の進行に伴い混合土が締め固められ変形しにくくなっているため、 m_v の値も次第に小さくなっていくのが見られる。また、3 種類の混合土の差異はほとんど認められず、同じ荷重レベルであれば同程度の m_v となることがわかる。

各ケースの載荷荷重と間隙比、 $C_c \cdot C_s$ と C_v 、 m_v の一覧表を表 5.2-4、表 5.2-5 に示

す。

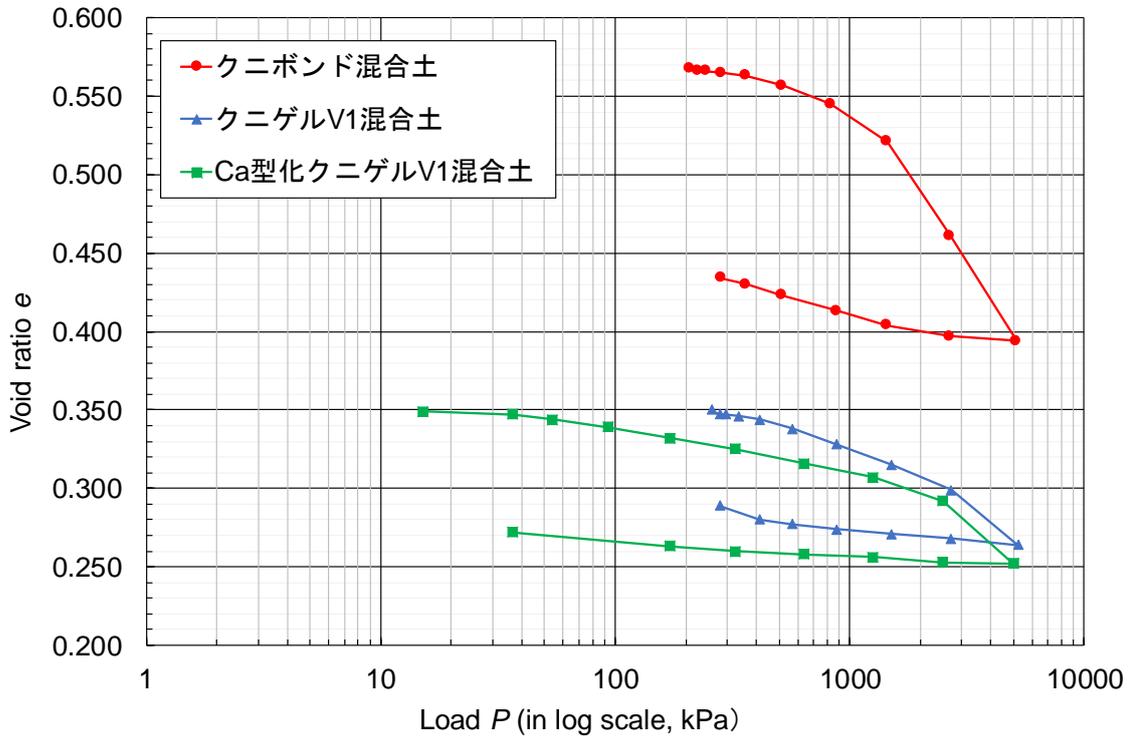


図 5.2-19 e - $\log P$ 曲線

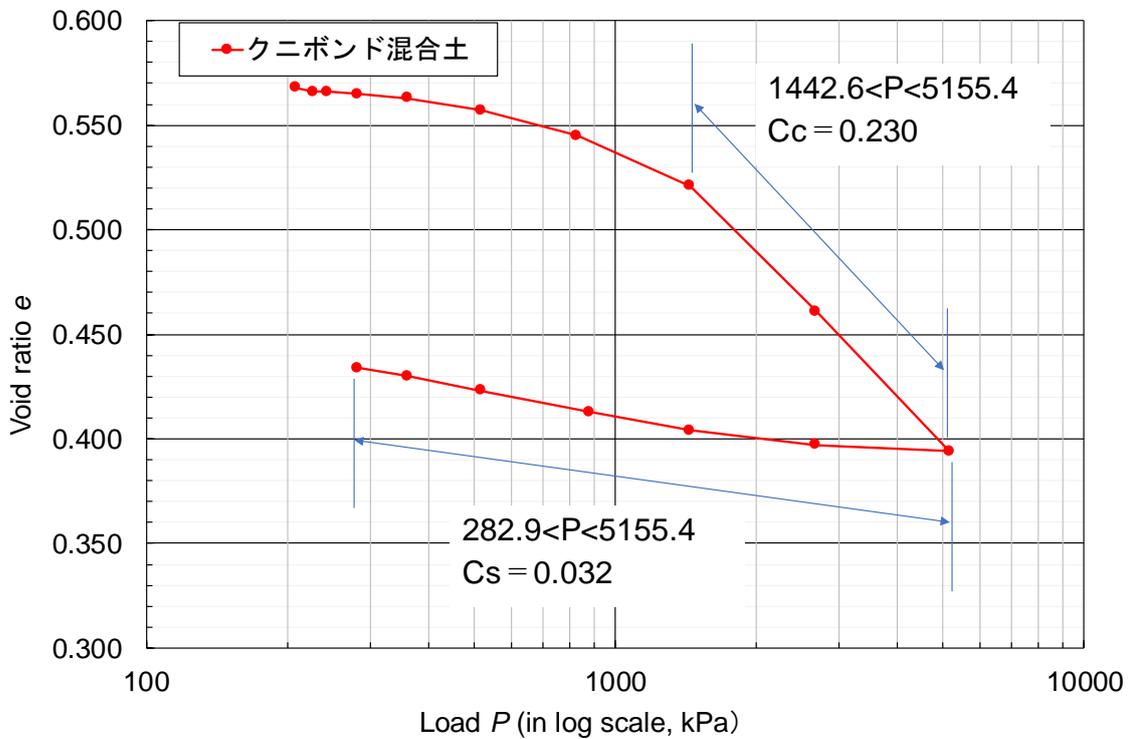


図 5.2-20 e - $\log P$ 曲線 (クニボンド混合土)

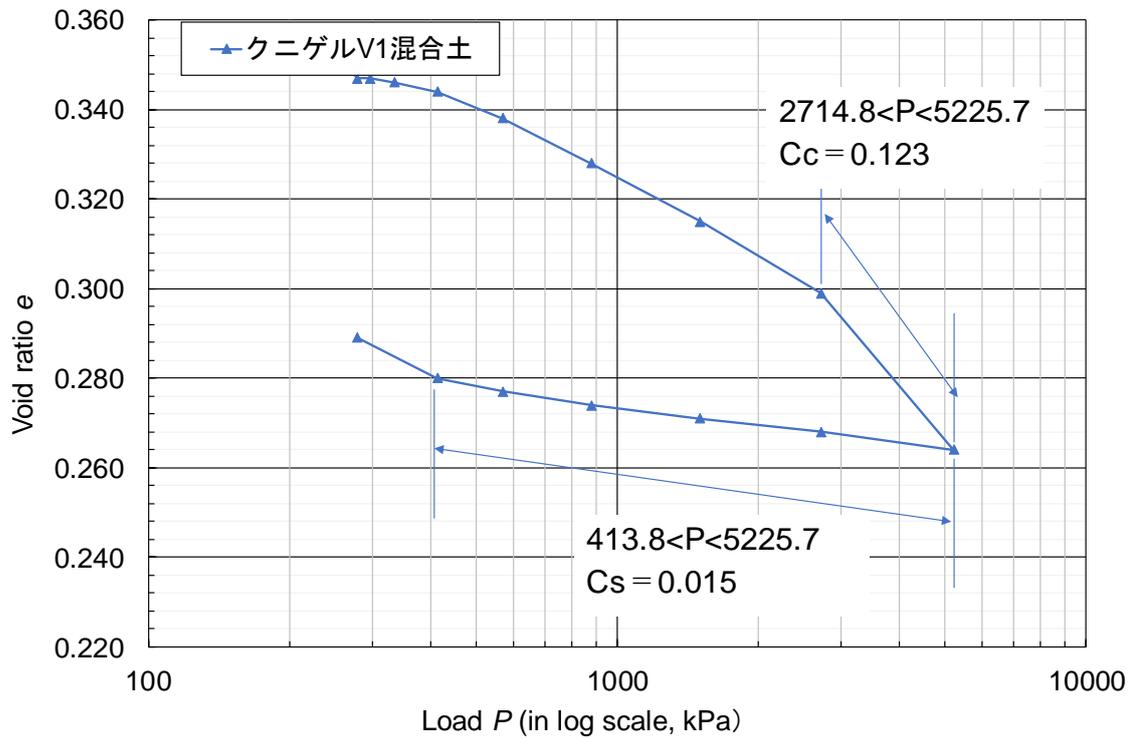


図 5.2-21 e - $\log P$ 曲線 (クニゲル V1 混合土)

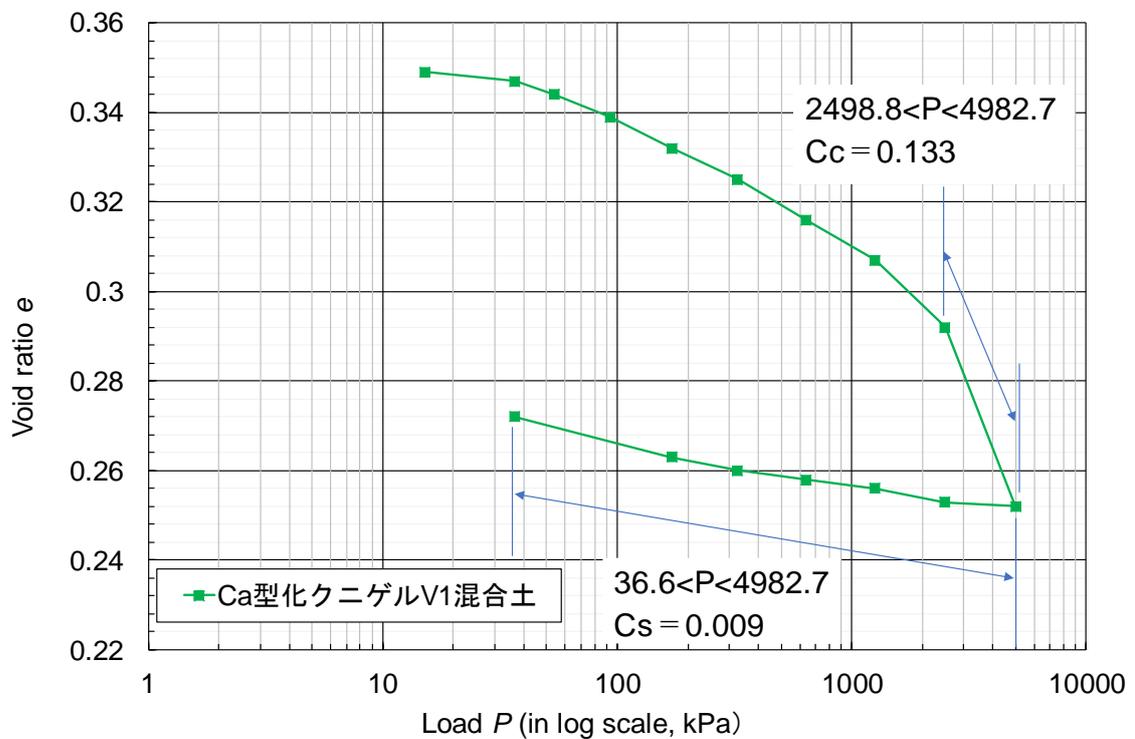


図 5.2-22 e - $\log P$ 曲線 (Ca 型化クニゲル V1 混合土)

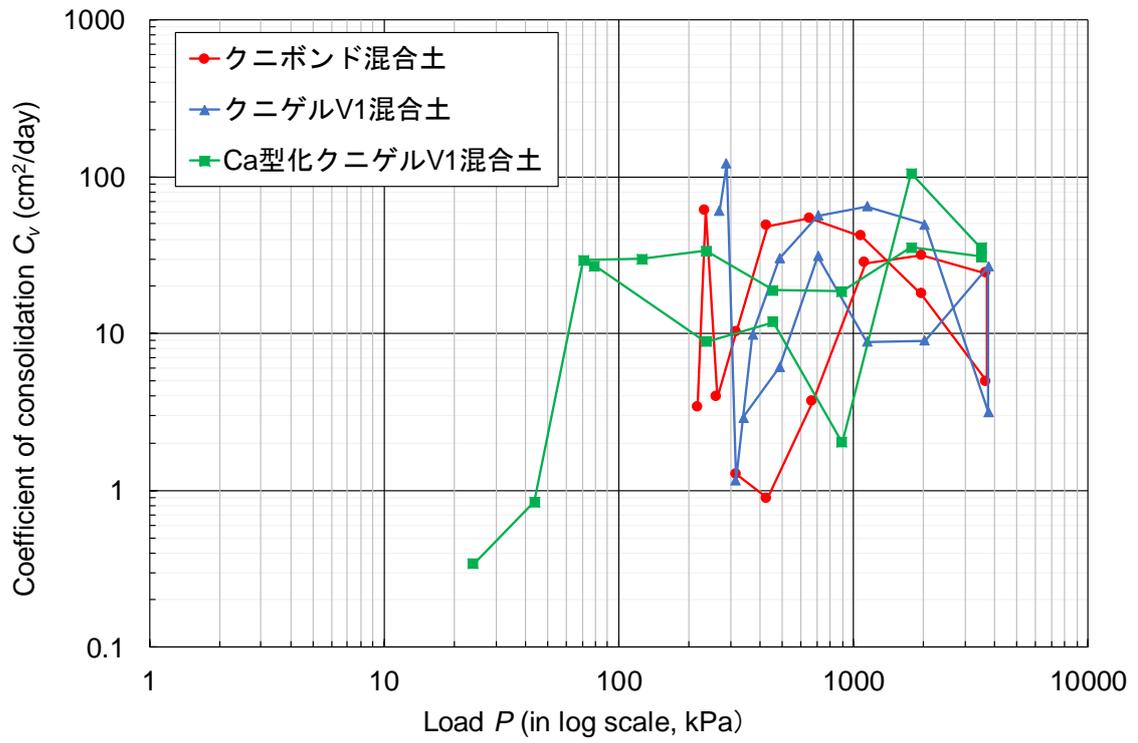


図 5.2-23 C_v - $\log P$ 曲線

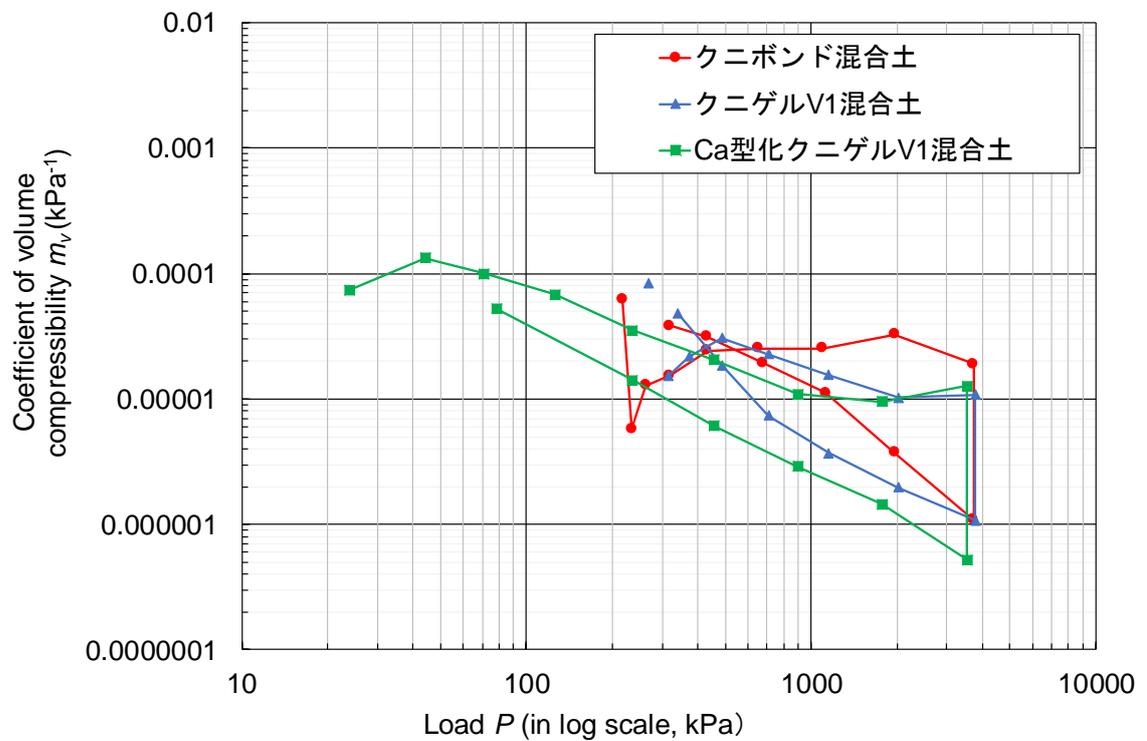


図 5.2-24 m_v - $\log P$ 曲線

表 5.2-4 各ケースの載荷荷重・間隙比・区間ごとの C_c, C_s

載荷段階	クニボンド混合土			クニゲルV1混合土			Ca型化クニゲルV1混合土		
	p kN/m ²	e	区間ごと 傾き (Cc, Cs)	p kN/m ²	e	区間ごと 傾き (Cc, Cs)	p kN/m ²	e	区間ごと 傾き (Cc, Cs)
膨潤圧	209.0	0.568	-	258.0	0.350	-	15.1	0.349	-
1	226.6	0.566	-	279.6	0.347	-	36.6	0.347	-
2	243.9	0.566	0.000	296.9	0.347	0.000	53.9	0.344	0.018
3	282.9	0.565	0.016	335.9	0.346	0.019	92.9	0.339	0.021
4	360.8	0.563	0.019	413.8	0.344	0.022	170.8	0.332	0.026
5	516.6	0.557	0.038	569.6	0.338	0.043	326.6	0.325	0.025
6	828.1	0.545	0.059	881.1	0.328	0.053	638.1	0.316	0.031
7	1442.6	0.521	0.100	1504.2	0.315	0.056	1261.2	0.307	0.030
8	2680.2	0.461	0.223	2714.8	0.299	0.062	2498.8	0.292	0.051
9	5155.4	0.394	0.236	5225.7	0.264	0.123	4982.7	0.252	0.133
10	2680.2	0.397	0.011	2714.8	0.268	0.014	2498.8	0.253	0.003
11	1442.6	0.404	0.026	1504.2	0.271	0.012	1261.2	0.256	0.010
12	881.1	0.413	0.042	881.1	0.274	0.013	638.1	0.258	0.007
13	516.6	0.423	0.043	569.6	0.277	0.016	326.6	0.26	0.007
14	360.8	0.430	0.045	413.8	0.280	0.022	170.8	0.263	0.011
15	282.9	0.434	0.038	279.6	0.289	0.053	36.6	0.272	0.013

表 5.2-5 各ケースの載荷荷重・ $c_v \cdot m_v$

載荷段階	クニボンド混合土			クニゲルV1混合土			Ca型化クニゲルV1混合土		
	P (kPa)	Cv	mV	P (kPa)	Cv	mV	P (kPa)	Cv	mV
1	218	3.39	6.25×10^{-5}	269.0	60.89	8.33×10^{-5}	24	0.34	7.44×10^{-5}
2	235	60.86	5.78×10^{-6}	288.0	121.56	-	44	0.84	1.33×10^{-4}
3	263	3.92	1.28×10^{-5}	316.0	1.16	1.54×10^{-5}	71	29.41	1.00×10^{-4}
4	319	10.12	1.54×10^{-5}	373.0	9.94	2.18×10^{-5}	126	29.87	6.80×10^{-5}
5	432	48.33	2.44×10^{-5}	485.0	30.10	3.08×10^{-5}	236	33.77	3.53×10^{-5}
6	654	54.29	2.54×10^{-5}	708.0	56.66	2.28×10^{-5}	457	18.84	2.05×10^{-5}
7	1093	41.66	2.54×10^{-5}	1151.0	65.01	1.56×10^{-5}	897	18.59	1.09×10^{-5}
8	1966	17.79	3.27×10^{-5}	2021.0	49.760	1.02×10^{-5}	1775	35.36	9.53×10^{-6}
9	3717	4.93	1.90×10^{-5}	3767.0	3.160	1.08×10^{-5}	3529	30.96	1.27×10^{-5}
10	3717	24.16	1.09×10^{-5}	3767.0	26.840	1.08×10^{-6}	3529	35.03	5.23×10^{-7}
11	1966	31.41	3.72×10^{-6}	2021.0	8.990	1.98×10^{-6}	1775	105.42	1.45×10^{-6}
12	1127	28.12	1.12×10^{-5}	1151.0	8.890	3.69×10^{-6}	897	2.03	2.89×10^{-6}
13	675	3.70	1.95×10^{-5}	708.0	31.120	7.38×10^{-6}	457	11.8	6.10×10^{-6}
14	432	0.89	3.15×10^{-5}	485.0	6.080	1.86×10^{-5}	236	8.89	1.41×10^{-5}
15	319	1.27	3.85×10^{-5}	340.0	2.910	4.84×10^{-5}	79	26.91	5.22×10^{-5}

⑥ 三軸圧縮強度試験

三軸圧縮強度試験は $\overline{\text{CU}}$ 条件で実施した。対象とした材料はクニゲル V1 混合土である。供試体のサイズは直径 50mm、高さ 100mm とした。圧密圧力は 100kPa、200kPa、300kPa、400kPa とし、背圧は 200kPa を負荷させた。図 5.2-25 に軸差応力～軸ひずみ関係を示す。圧密圧力が大きいほど軸差応力も大きくなる傾向を見せた。また、軸ひずみが大きくなるに従い、間隙水圧が負圧となる傾向が見られた。これは軸圧縮過程で発生するダイレイタンスーによる影響で供試体内にサクションが発生したことに起因すると考えられる。

図 5.2-25 に示した軸差応力～軸ひずみ関係より、図 5.2-26 に示すモール・クーロンの応力円、図 5.2-27 に示す主応力比～軸ひずみ関係、図 5.2-28 に示す主応力経路を作成した。モール・クーロンの応力円および主応力経路より、有効応力を元にした粘着力 c' および内部摩擦核 ϕ' を求めた。モール・クーロンの応力円から求めた粘着力 c' および内部摩擦核 ϕ' は $c'=54.0 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi'=28.2^\circ$ であり、主応力経路から求めた粘着力 c' および内部摩擦核 ϕ' は $c'=69.6 \text{ kN/m}^2$ 、 $\phi'=27.6^\circ$ で両者に大きな乖離は認められない。図 5.2-29 に示す軸差応力～平均主応力関係より限界状態パラメータ M を求めた。今回の限界状態パラメータ M は 1.502 であった。これらの結果の一覧表を表 5.2-6 に示す。

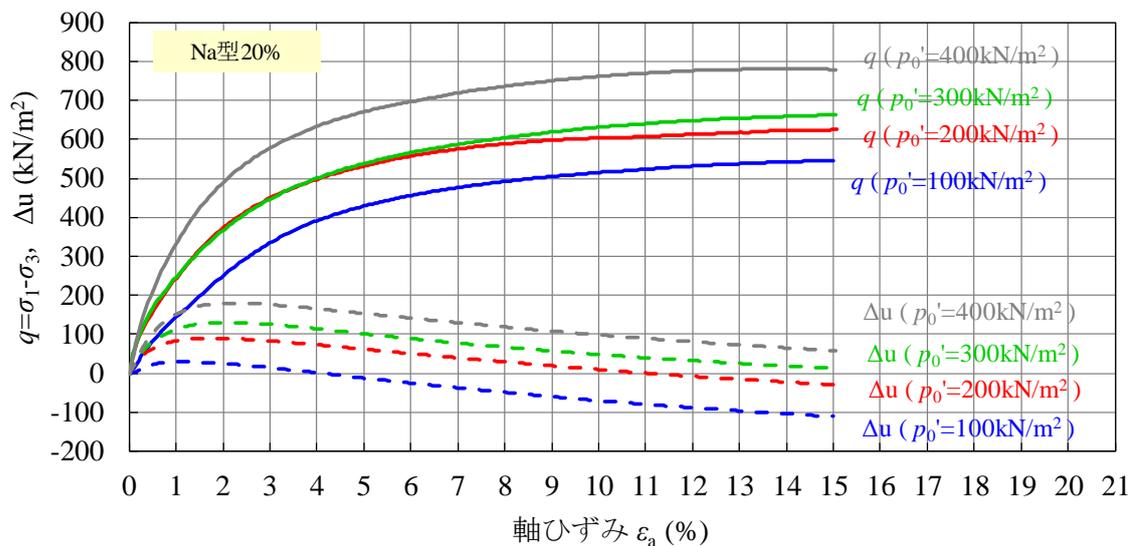


図 5.2-25 軸差応力～軸ひずみ関係 (クニゲル V1 混合土)

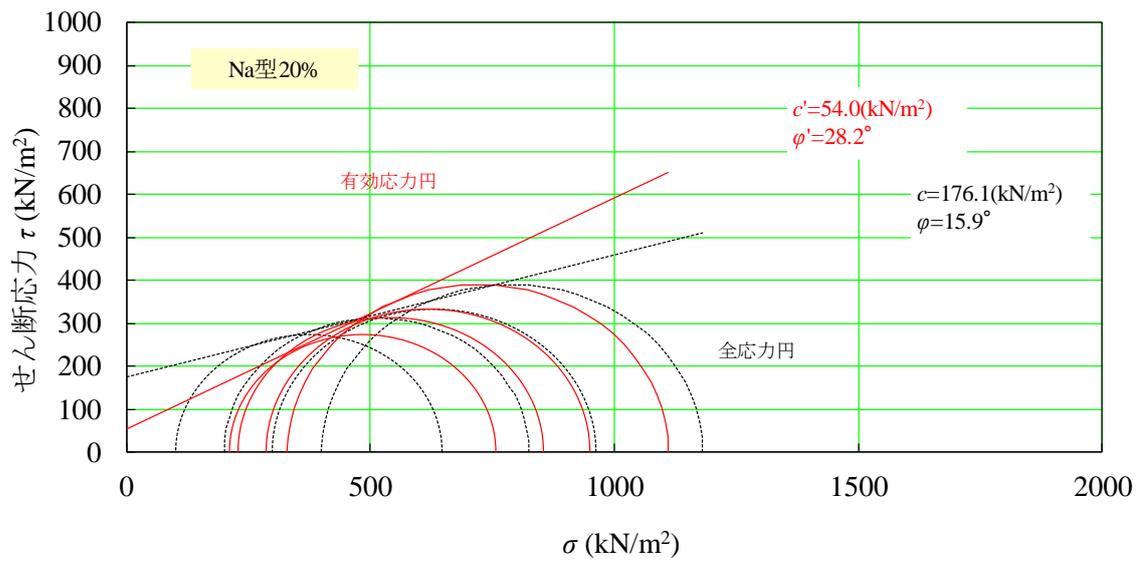


図 5.2-26 モール・クーロンの応力円 (クニゲル V1 混合土)

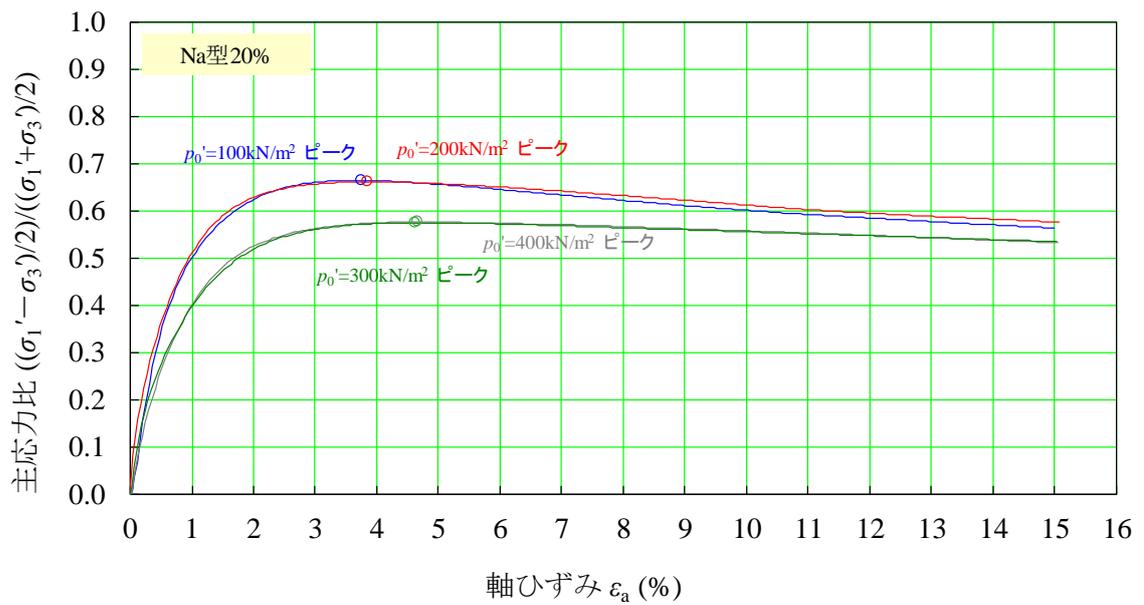


図 5.2-27 主応力比～軸ひずみ関係 (クニゲル V1 混合土)

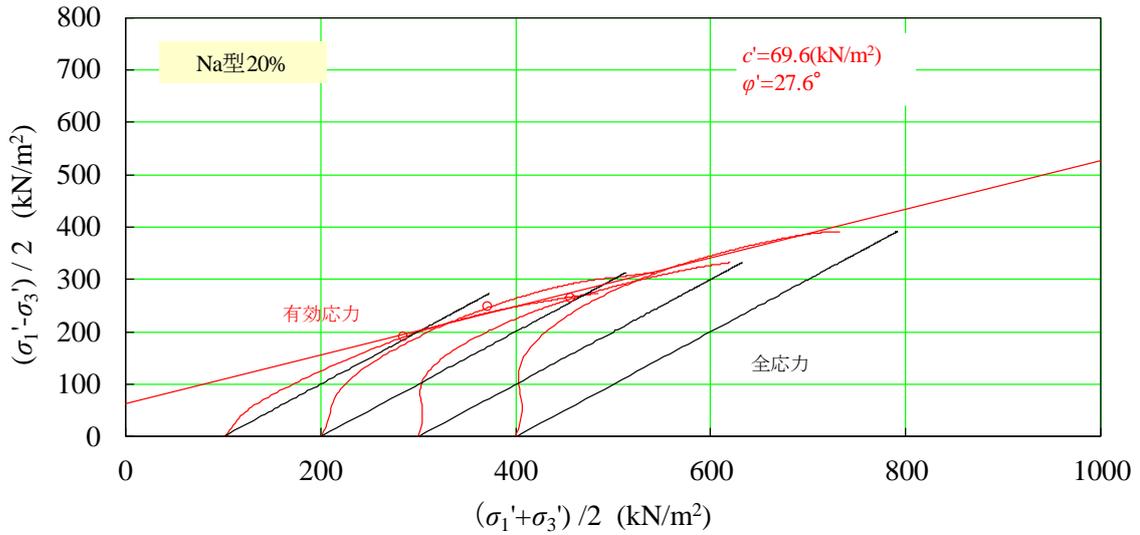


図 5.2-28 主応力経路 (クニゲル V1 混合土)

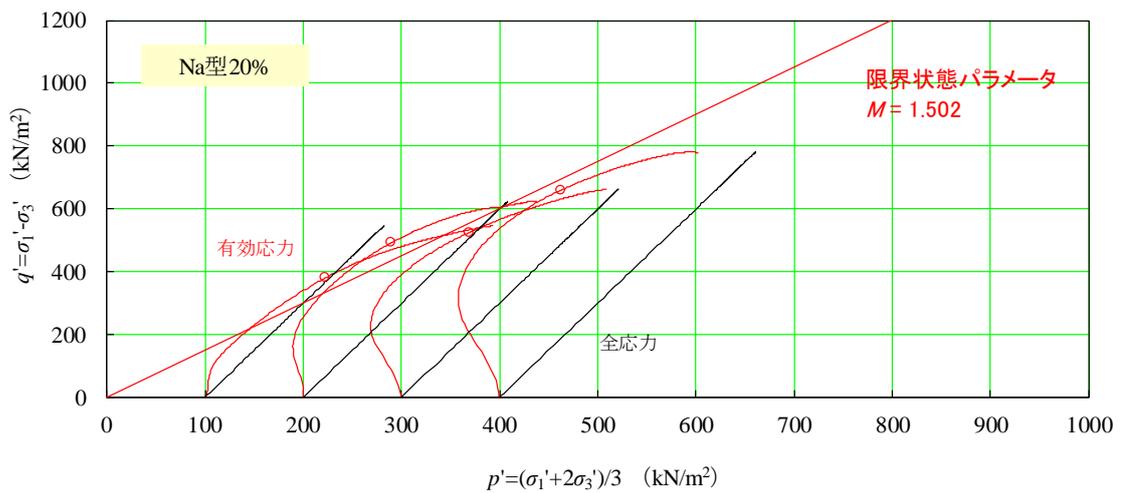


図 5.2-29 軸差応力～平均主応力関係

表 5.2-6 難透水性覆土 (クニゲル V1 混合土) の三軸圧縮強度試験結果

Case	Be 混合率 (%)	モール応力円		主応力経路		限界状態パラメータ
		c'	ϕ'	c'	ϕ'	
		(MPa)	(deg)	(MPa)	(deg)	
クニゲル V1 混合土	20	54.0	28.2	69.6	27.6	1.502

⑦ 繰り返し三軸試験（動的変形試験）

図 5.2-30～図 5.2-32 に三種類の混合土の剛性の履歴減衰（H-D モデル）を示す。せん断ひずみの増加に伴い剛性の低下がみられる。クニボンド混合土の場合は、ひずみが 0.01%程度、クニゲル V1 混合土と Ca 型化クニゲル V1 混合土の場合は、ひずみが 0.001%程度まで剛性が大きく低下することはなかった。履歴減衰係数はクニボンド混合土が最も高く 26.62%、クニゲル V1 混合土が 23.80%、Ca 型化クニゲル V1 混合土が 19.45%であった。

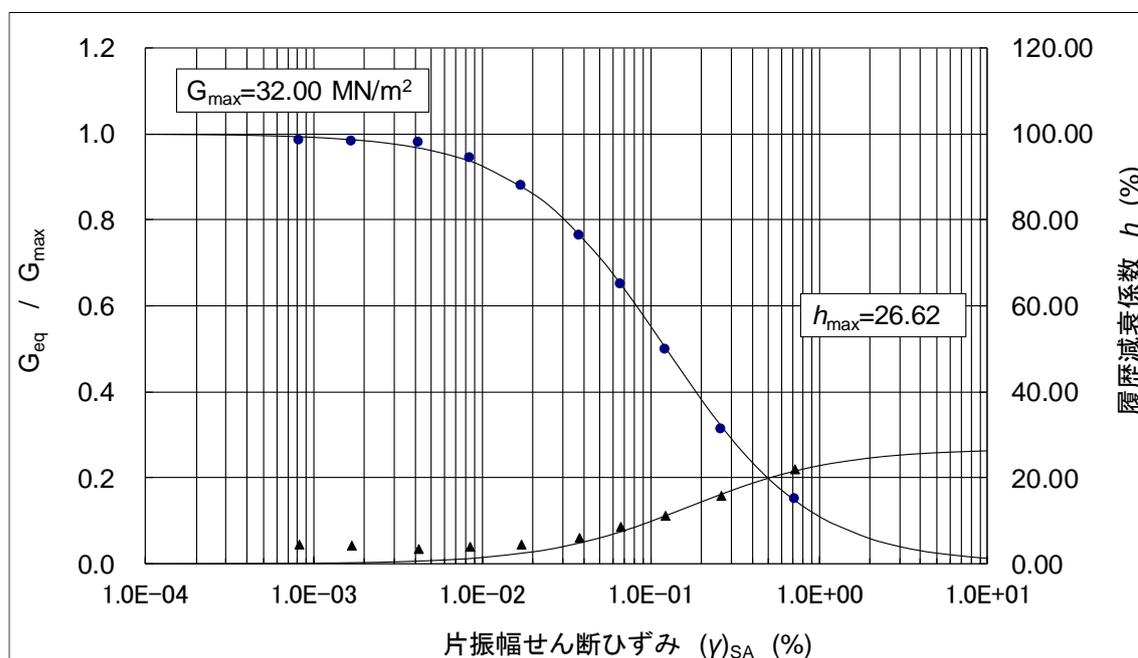


図 5.2-30 クニボンド混合土の剛性の履歴減衰（H-D モデル）

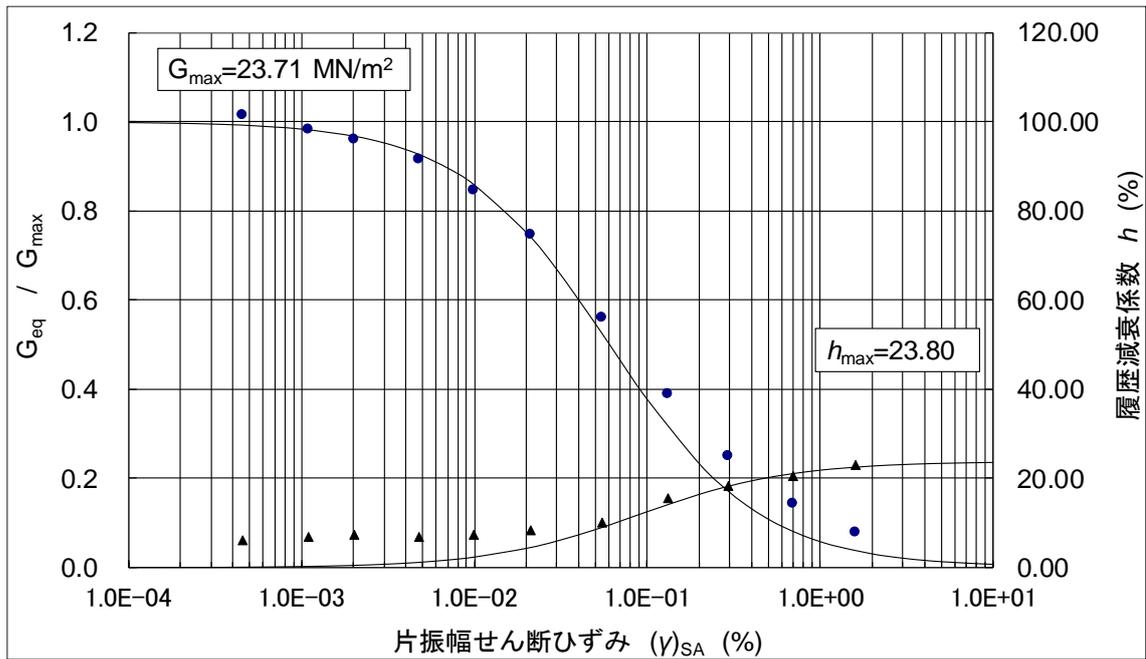


図 5.2-31 クニゲル V1 混合土の剛性の履歴減衰 (H-D モデル)

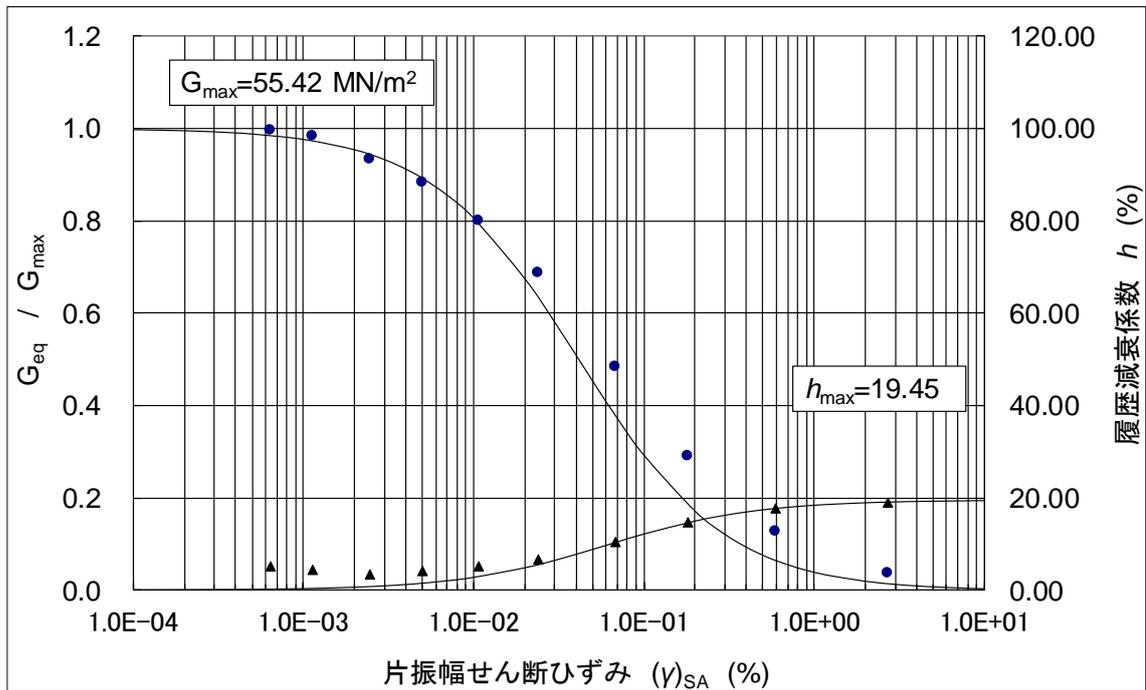


図 5.2-32 Ca 型化クニゲル V1 混合土の剛性の履歴減衰 (H-D モデル)

⑧ 繰り返し三軸試験（液状化試験）

図 5.2-33～図 5.2-35 に三種類の混合土の液状化強度試験の結果を示す。繰り返し回数 20 回の時の応力増幅比 σ_d / σ'_0 は、クニボンド混合土で 0.655、クニゲル V1 混合土で 0.407、Ca 型クニゲル V1 で 0.461 であった。

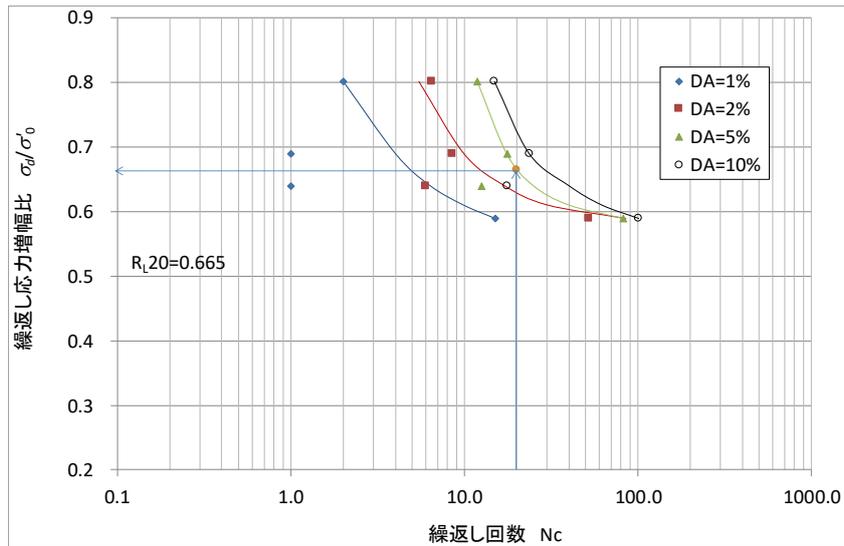


図 5.2-33 クニボンド混合土の液状化強度

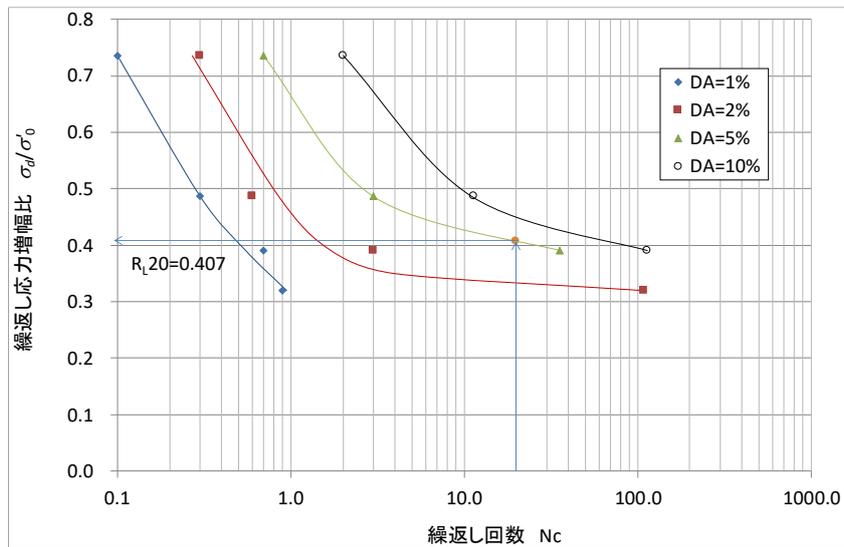


図 5.2-34 クニゲル V1 混合土の液状化強度

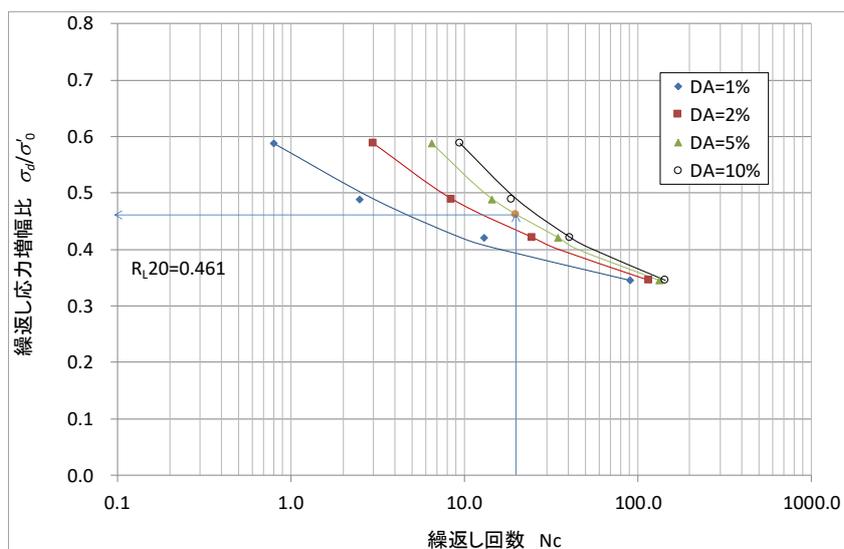


図 5.2-35 Ca 型化クニゲル V1 混合土の液状化強度

⑨ 弾性波速度測定

図 5.2-36～図 5.2-38 に三種類の混合土の弾性波速度測定時の弾性波波形の経時変化を示す。図 5.2-36～図 5.2-38 に示したように波形が変化する点の時間を読み取るのだが、今回の混合土は三種類とも V_s の方の判別は難しくなった。

測定した結果を表 5.2-7 に示す。 V_p の平均値はクニボンド混合土が 1453.0m/s、クニゲル V1 混合土が 674.8m/s、Ca 型化クニゲル V1 混合土が 1072.7m/s となり、クニゲル V1 混合土が最も小さかったため、Ca 型ベントナイトが混合されているケースの方が V_p は大きくなった。 V_s の平均値はクニボンド混合土が 130.3m/s、クニゲル V1 混合土が 120.9m/s、Ca 型化クニゲル V1 混合土が 155.5m/s となり、有意な差は見られなかった。

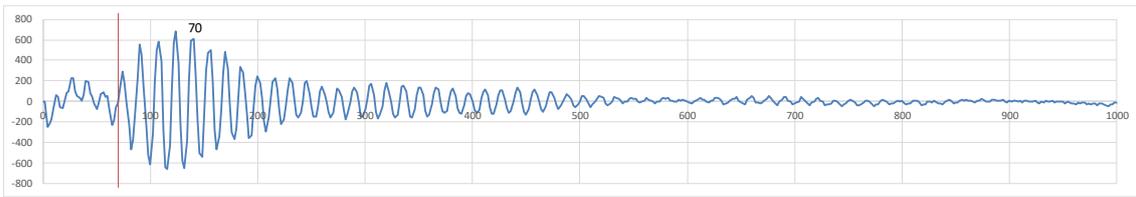


図 5.2-36 クニボンド混合土の弾性波波形の経時変化（上； V_p 、下； V_s ）

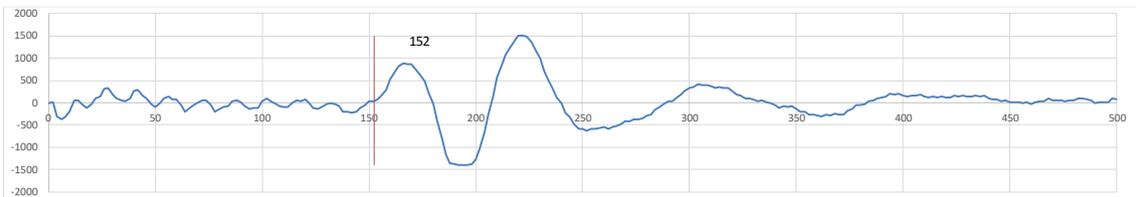


図 5.2-37 クニゲル V1 混合土の弾性波波形の経時変化（上； V_p 、下； V_s ）

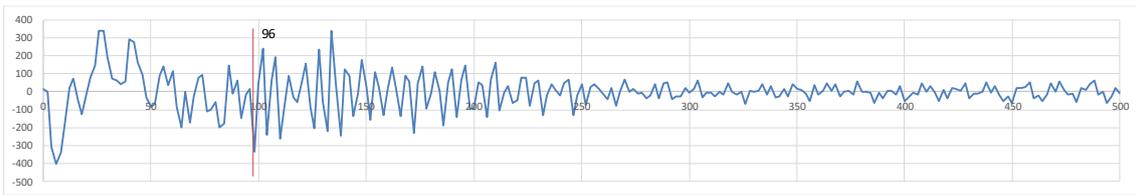


図 5.2-38 Ca 型化クニゲル V1 混合土の弾性波波形の経時変化（上； V_p 、下； V_s ）

表 5.2-7 難透水性覆土材料の弾性波速度測定結果

物性値		クニボンド 混合土	クニゲル V1 混合土	Ca 型化 V1 混合土
V_p (m/s)	1 回目	1474.0	669.8	1061.2
	2 回目	1432.3	678.8	1084.1
	平均	1453.2	674.3	1072.7
V_s (m/s)	1 回目	126.8	117.0	164.6
	2 回目	133.8	124.8	146.4
	平均	130.3	120.9	155.5
動ポアソン比		0.496	0.483	0.489
動弾性係数(MN/m ²)		102.8	94.9	159.9
動せん断弾性係数(MN/m ²)		34.4	32.0	53.7

5.2.2 下部覆土

(1) 要求性能と主な仕様

下部覆土に要求される性能は第3章に示した通りであり、主な仕様は以下の通り。

- ・ 材料 現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂および碎石を混合
- ・ 透水係数（施工時点）：巨視的透水係数として $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下
- ・ 厚さ 2m 以上
- ・ 密度 $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上

※ 上記の透水特性（低透水性）および放射線の遮蔽性能（遮蔽性）に加えて長期機能維持特性（化学的安定性、変形追従性、液状化抵抗性）についても性能を満たす見通しがあることを得る必要がある。

(2) 検討方針

低透水性と液状化抵抗性を両立させるための方針を以下に示す。

- ・ 低透水性を満足するようベントナイトを混合するが、最小限度（5～10%）にとどめる。
- ・ 粒度調整を行うことで脆性的な破壊を防ぐとともに、粗粒砂岩のバラツキを抑える調整材とする。
- ・ せん断剛性を増加させることよりも、液状化強度値を増加させることを指向する。

乾燥密度の増加を志向するために、最適粒度曲線 Fuller 曲線式 [33]を用い、Futhfuchs の図解法 [34]により粒度調整を行うことで、下部覆土の材料使用を設定した。

Fuller 曲線

$$P = \left(\frac{d}{D_0}\right)^n \times 100(\%) \quad \text{数式 5.2-1}$$

ここに、

P : ふるい通過百分率

d : 最大粒径 (20mm)

D_0 : 粒径

n : 定数

Ruthfuchs の図解法による粒度調整例を以下に示す。

- ・ 求めようとする粒度の粒径加積曲線を通過百分率で表し、粒子の大きさの分布を直線で表されるように図示する。
- ・ 同一尺度を用いて、混合する原材料の粒径加積曲線を記入し、この曲線をほぼ近似する直線になおす（図 5.2-39 PG、BD、CO）。
- ・ これらの直線と反対端を結び（図 5.2-39 BG、CD）、求めようとする粒径加積曲線（直線）との交点を求めると（図 5.2-39 L、M）、その百分率が配合割合を示すことになる。

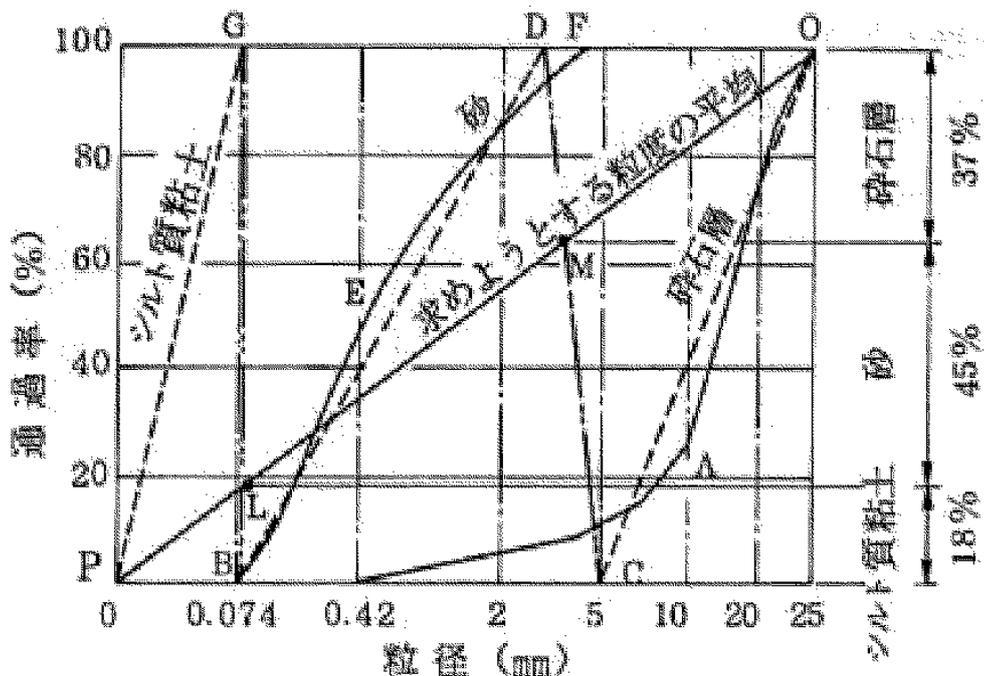


図 5.2-39 粒度調整の図解例 [33]

(3) 検討ケース

Fuller 曲線の定数 n の範囲を 0.5 以下で、単一の材料があまり突出しない（60%以下）混合土の組み合わせを設定した ($n=0.2\sim0.4$ で 0.1 単位)。また、ベントナイト混合率については当初 5%としていたが、試験結果を踏まえて混合率を 10%とした Case10-4～Case10-6 を実施した。表 5.2-8 に下部覆土の検討ケース一覧を示す。

図 5.2-40 に各試験ケースの粒度を示す。Case05-1～Case05-3 は粗粒砂岩の混合率を 45%とし、粗粒砂岩とベントナイト以外の 50%の部分の碎石と碎砂の混合率を変えたケースである。Case05-1～Case05-3 の粒度を図 5.2-41 に示す。また、Case05-4～Case05-6 は Fuller 指数が 0.4、0.3、0.2 の Fuller 曲線に近似するような粒度としたケースである。図 5.2-42 に Case05-4～Case05-6 の粒度を示す。図 5.2-43 に Case10-4～Case10-6 の粒度を示す。同図には、最大粒径が 20mm の時の Fuller 曲線 (n=0.4、0.3、0.2) も示している。表 5.2-9 に下部覆土の締固め試験結果一覧を示す。

図 5.2-44～図 5.2-53 には、各ケースの締固め曲線を示す。また、締固め試験結果の一覧を表 5.2-9 に示す。

Case05-1～Case05-3 の締固め曲線の比較を図 5.2-54 に示す。Case05-1 が最も最大乾燥密度は大きくなった。すなわち碎石が多いほど、最大乾燥密度が大きくなると言える。

Case05-4～Case05-6 の締固め曲線の比較を図 5.2-55 に示す。Case05-4 が最も最大乾燥密度は大きい。すなわち、Fuller 指数が 0.2～0.4 の範囲では、Fuller 指数が大きいほど得られる最大乾燥密度は大きいという結果であった。今回の配合では、Fuller 指数が大きい方が粗粒砂岩の割合が小さく、玄武岩の碎石・碎砂の割合が大きくなるため、得られる最大乾燥密度は大きくなったものと考えられる。

Case10-4～Case10-6 の締固め曲線の比較を図 5.2-56 に示す。Case05-4～Case05-6 の時と同様に、Case10-4 が最も最大乾燥密度は大きいという結果であった。図 5.2-57 には、ベントナイト混合率が 5%の時の結果も合わせて示す。Fuller 指数が 0.4 および 0.3 の時 (Case05-4～Case05-5、Case10-4～Case10-5) は、ベントナイト混合率が 10%の時の方が最大乾燥密度が大きくなったが、Fuller 指数が 0.2 の時 (Case05-6、Case10-6) は、若干ではあるがベントナイト混合率が 5%の時の方が 10%の時より最大乾燥密度は大きかった。

表 5.2-8 下部覆土の検討ケース一覧 (Step2)

Case	混合率 (%)				備考
	粗粒砂岩	津軽 2 号	玄武岩		
			碎石	碎砂	
Case05-1	45	5	40	10	
Case05-2	45	5	30	20	
Case05-3	45	5	15	35	
Case05-4	20	5	45	30	n=0.4
Case05-5	35	5	35	25	n=0.3
Case05-6	60	5	20	15	n=0.2
Case10-4	15	10	45	30	n=0.4
Case10-4'	20	10	40	30	
Case10-5	30	10	35	25	n=0.3
Case10-6	55	10	20	15	n=0.2

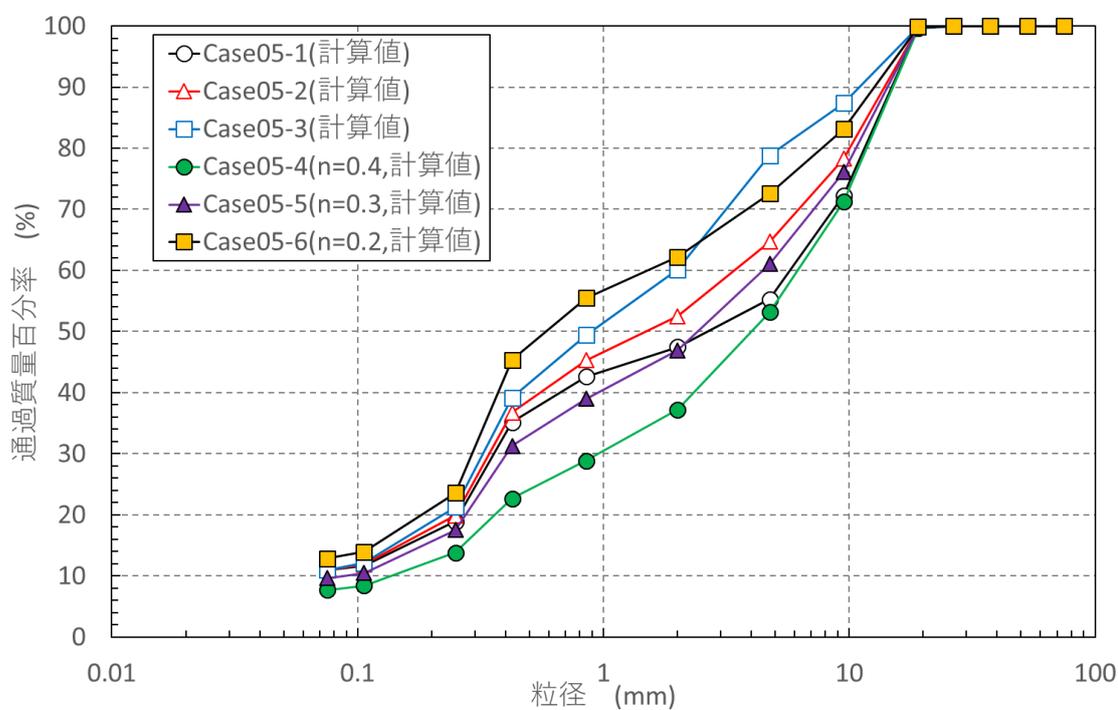


図 5.2-40 Step2 における各混合土の粒度

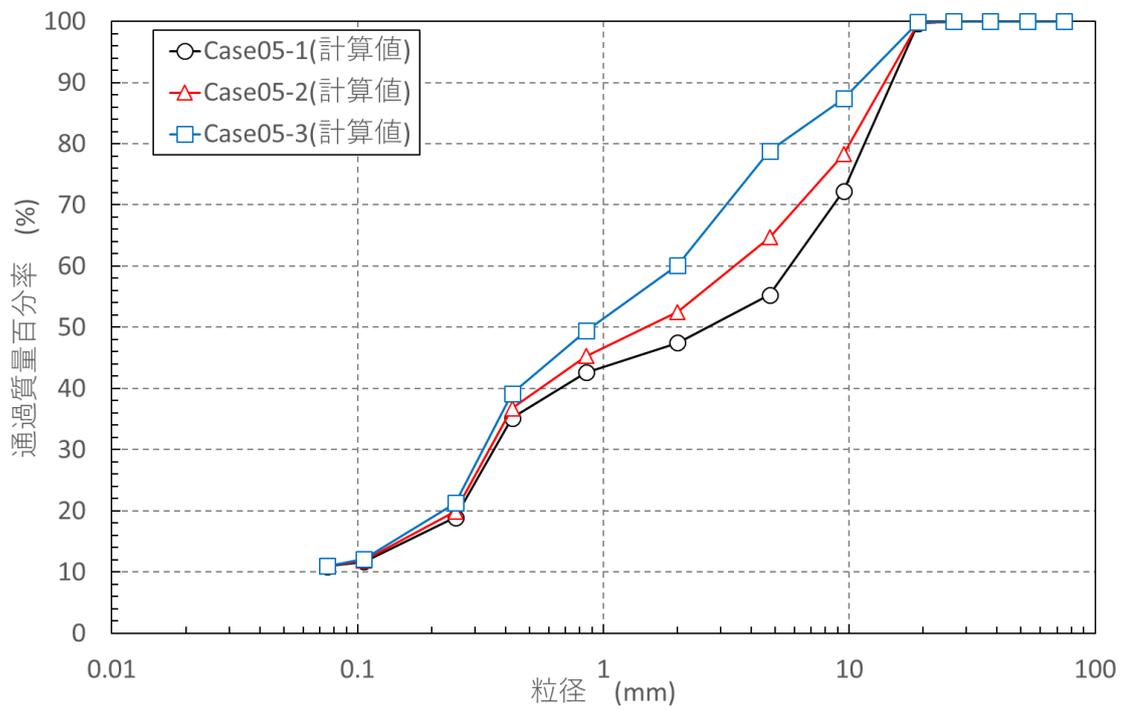


図 5.2-41 Step2 における各混合土の粒度 (Case05-1~Case05-3)

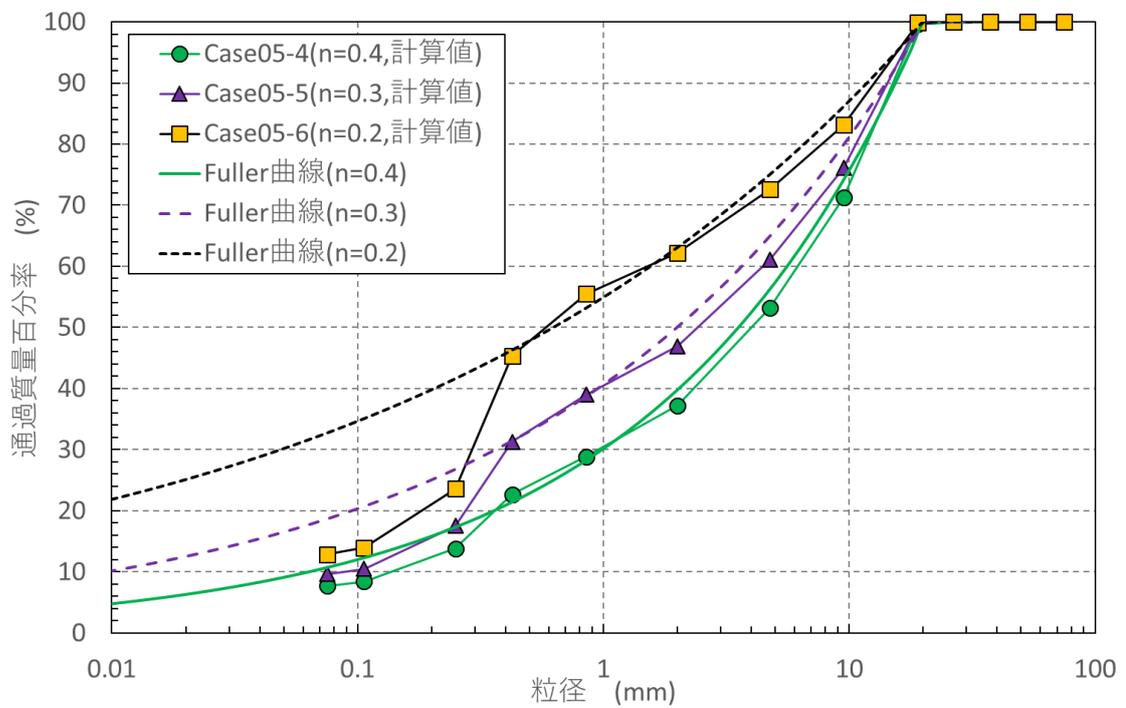


図 5.2-42 Step2 における各混合土の粒度 (Case05-4~Case05-6)

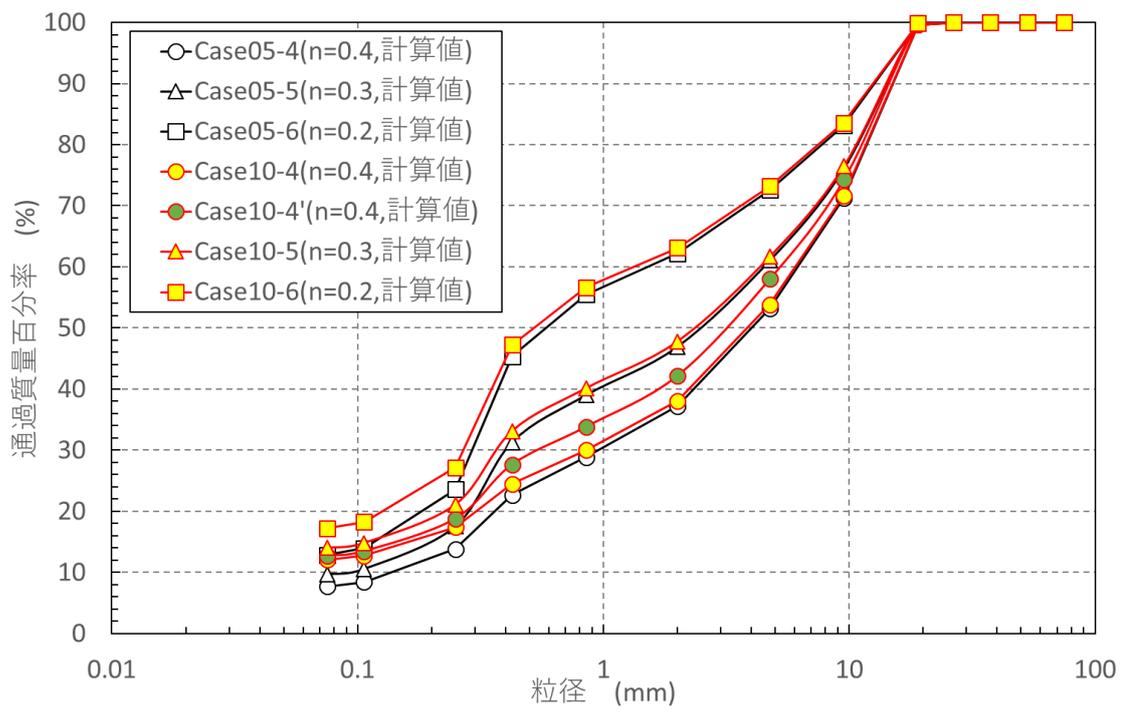


図 5.2-43 Step3 における各混合土の粒度 (Case10-4~Case10-6)

表 5.2-9 下部覆土の締固め試験結果 (Step2,Step3)

Case	母岩		ベントナイト		購入石			土粒子 密度 (Mg/m ³)	締固め試験結果				
	種類	混合率	種類	混合率	種類	碎石	砕砂		最適 含水比 (%)	最大 乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比 (-)	間隙率 (%)	飽和度 (%)
						混合率	混合率						
Case05-1	粗粒砂岩	45	津軽2号	5	玄武岩	40	10	2.771	10.8	2.006	0.381	27.6	78.5
Case05-2	粗粒砂岩	45	津軽2号	5	玄武岩	30	20	2.771	12.2	1.990	0.392	28.2	86.1
Case05-3	粗粒砂岩	45	津軽2号	5	玄武岩	15	35	2.771	12.8	1.943	0.426	29.9	83.2
Case05-4	粗粒砂岩	20	津軽2号	5	玄武岩	45	30	2.778	9.5	2.114	0.314	23.9	84.0
Case05-5	粗粒砂岩	35	津軽2号	5	玄武岩	35	25	2.774	10.9	2.033	0.364	26.7	83.0
Case05-6	粗粒砂岩	60	津軽2号	5	玄武岩	20	15	2.767	13.1	1.929	0.434	30.3	83.4
Case10-4	粗粒砂岩	15	津軽2号	10	玄武岩	45	30	2.765	8.0	2.127	0.300	23.1	73.7
Case10-4'	粗粒砂岩	20	津軽2号	10	玄武岩	40	30	2.764	10.0	2.099	0.317	24.1	87.2
Case10-5	粗粒砂岩	30	津軽2号	10	玄武岩	35	25	2.761	9.9	2.047	0.349	25.9	78.4
Case10-6	粗粒砂岩	55	津軽2号	10	玄武岩	20	15	2.754	14.0	1.920	0.434	30.3	88.8

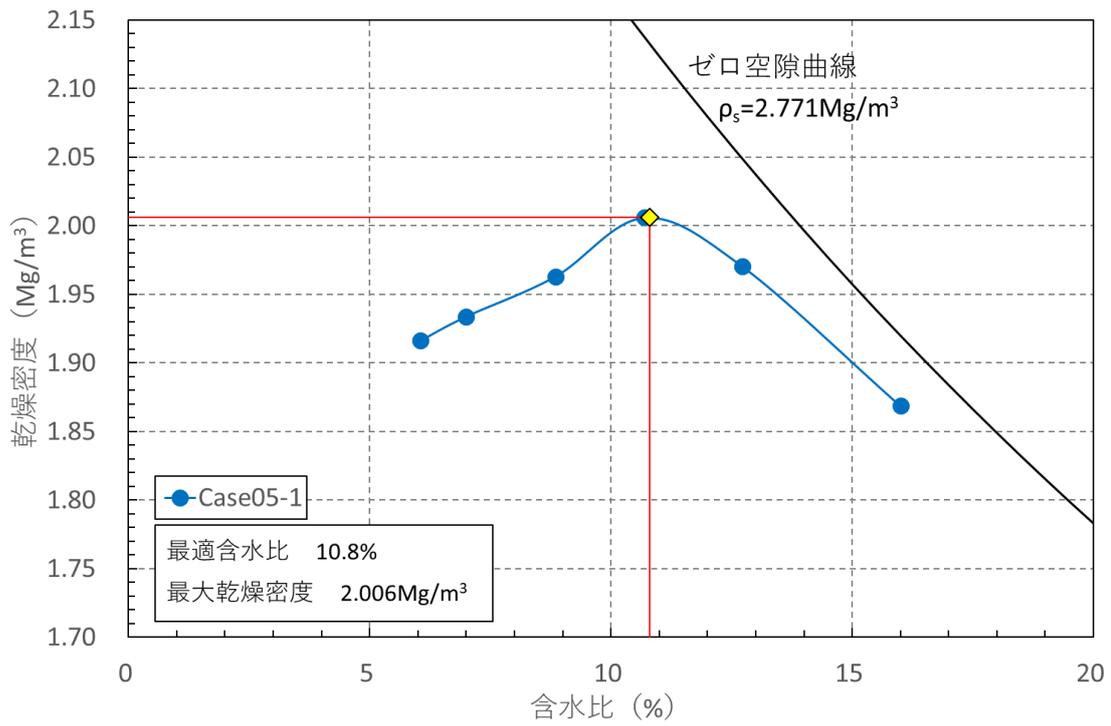


図 5.2-44 締固め試験結果

(Case05-1；粗粒砂岩 45%、碎石 40%、砕砂 10%、津軽 2 号 5%)

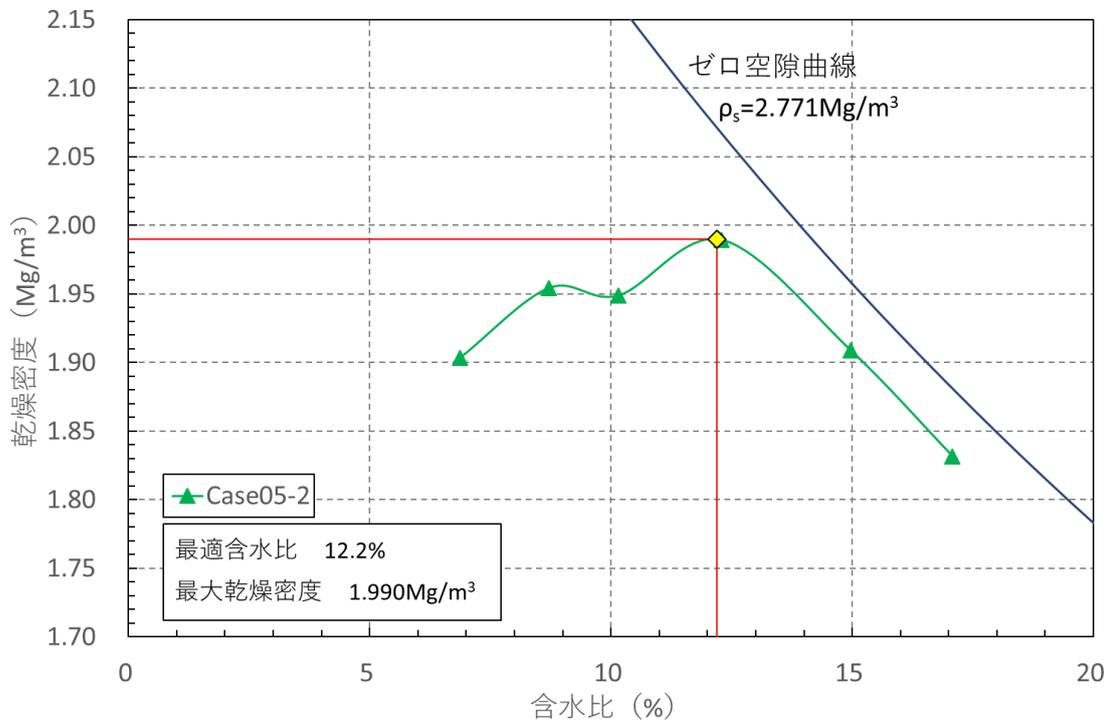


図 5.2-45 締固め試験結果

(Case05-2；粗粒砂岩 45%、碎石 30%、砕砂 20%、津軽 2 号 5%)

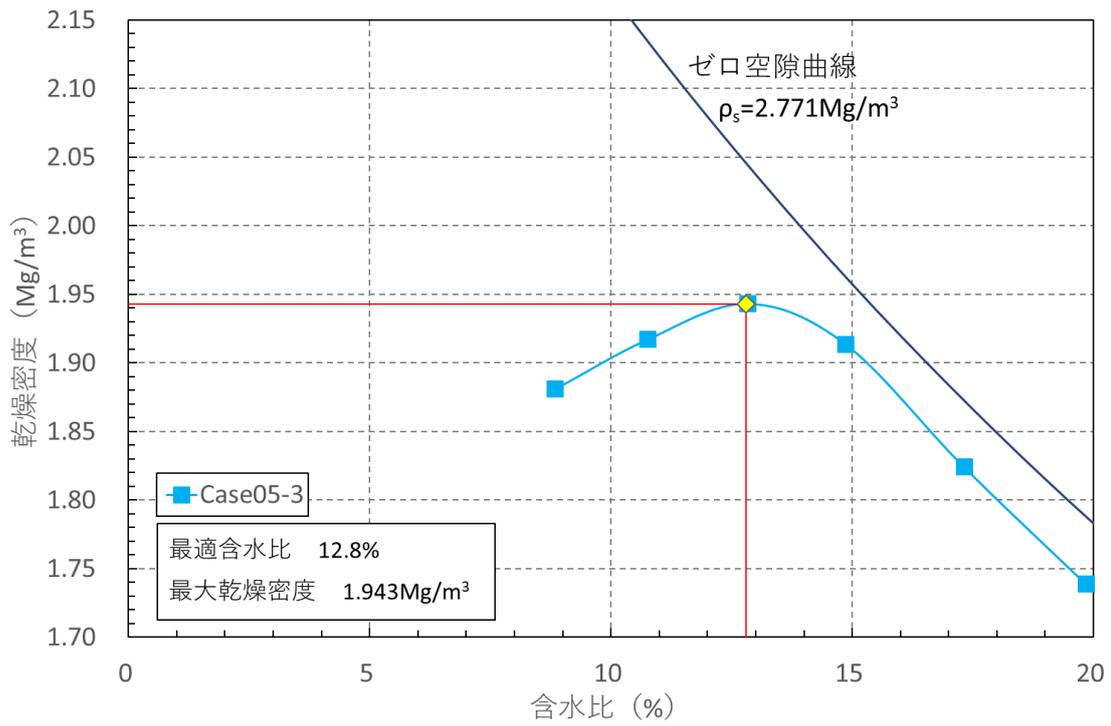


図 5.2-46 締固め試験結果

(Case05-3；粗粒砂岩 45%、碎石 15%、砕砂 35%、津軽 2 号 5%)

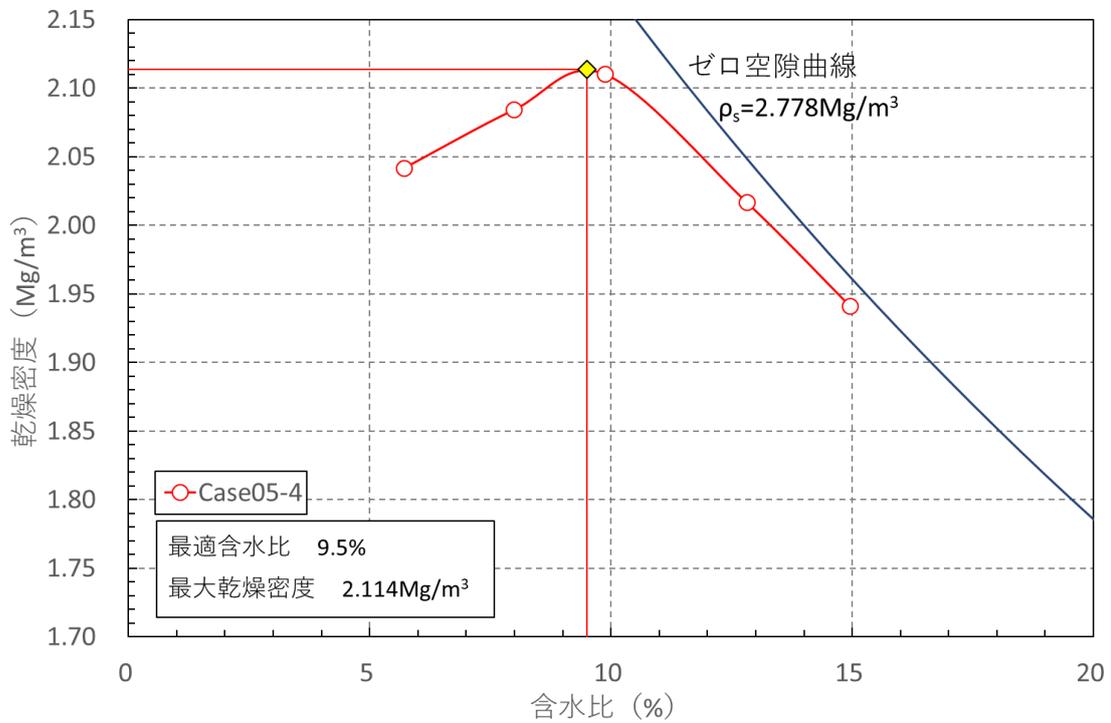


図 5.2-47 締固め試験結果

(Case05-4；粗粒砂岩 20%、碎石 45%、砕砂 30%、津軽 2 号 5%)

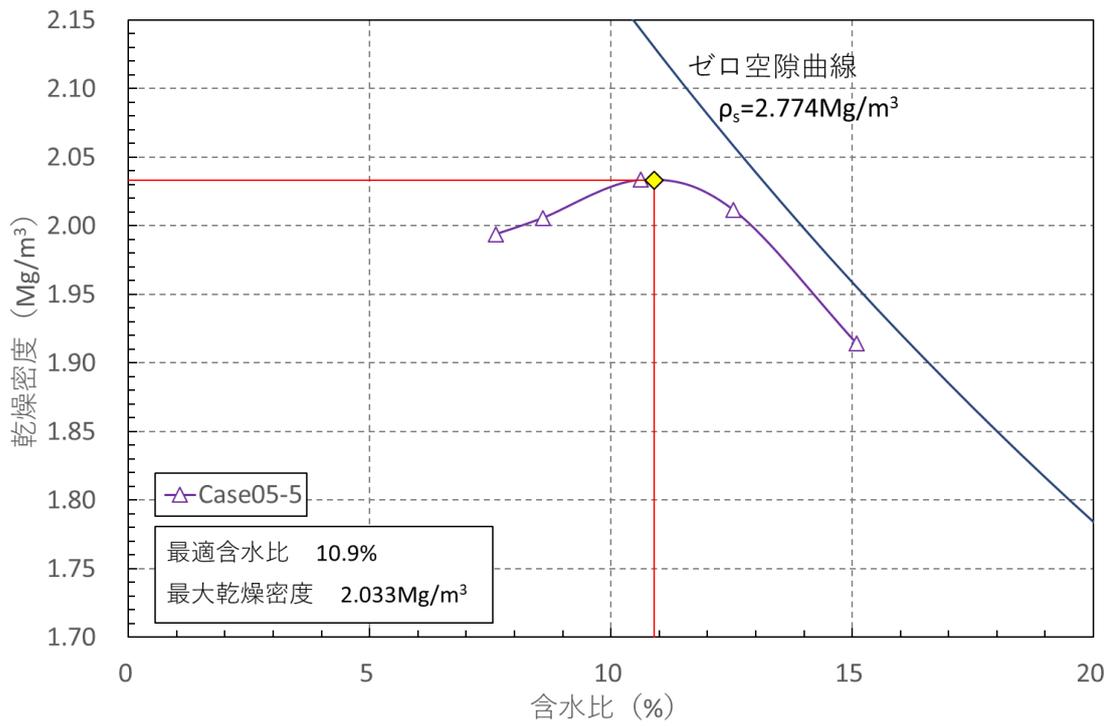


図 5.2-48 締固め試験結果

(Case05-5 ; 粗粒砂岩 35%、碎石 35%、砕砂 25%、津軽 2 号 5%)

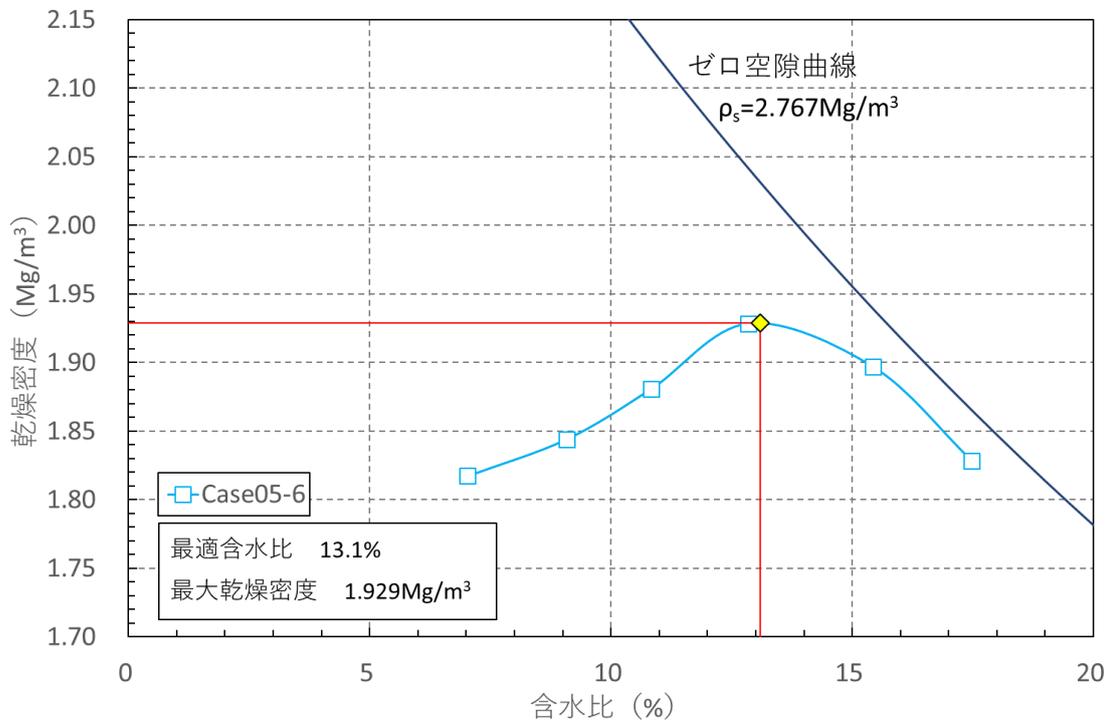


図 5.2-49 締固め試験結果

(Case05-6 ; 粗粒砂岩 60%、碎石 20%、砕砂 15%、津軽 2 号 5%)

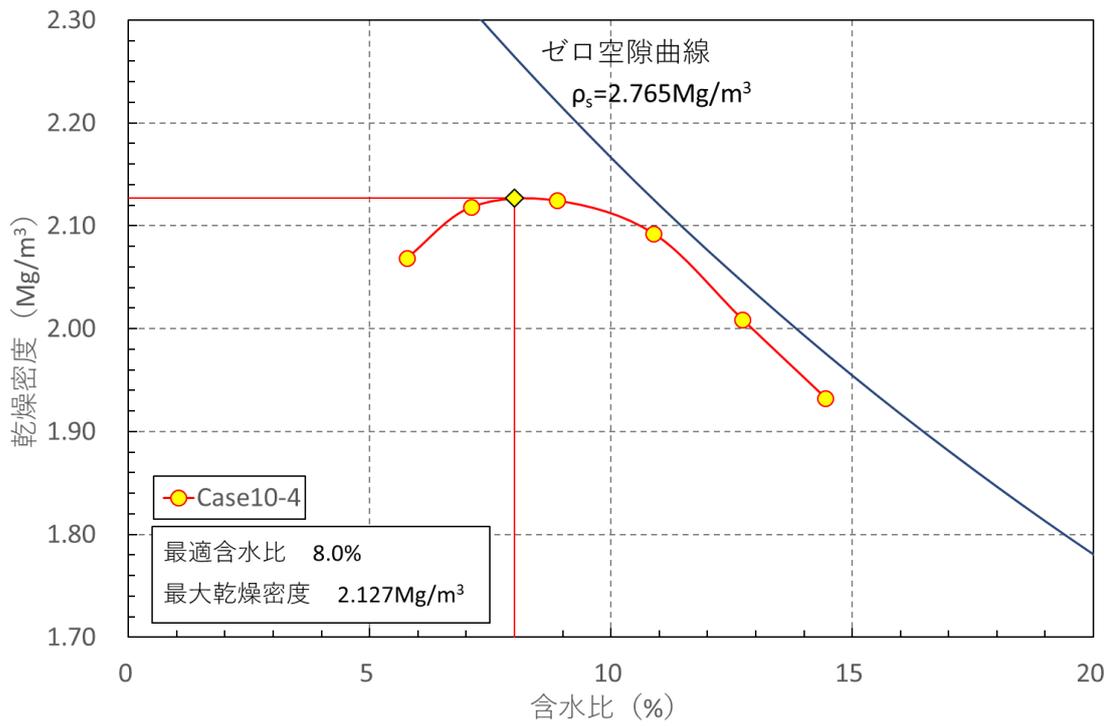


図 5.2-50 締固め試験結果

(Case10-4 ; 粗粒砂岩 15%、碎石 45%、碎砂 30%、津軽 2 号 10%)

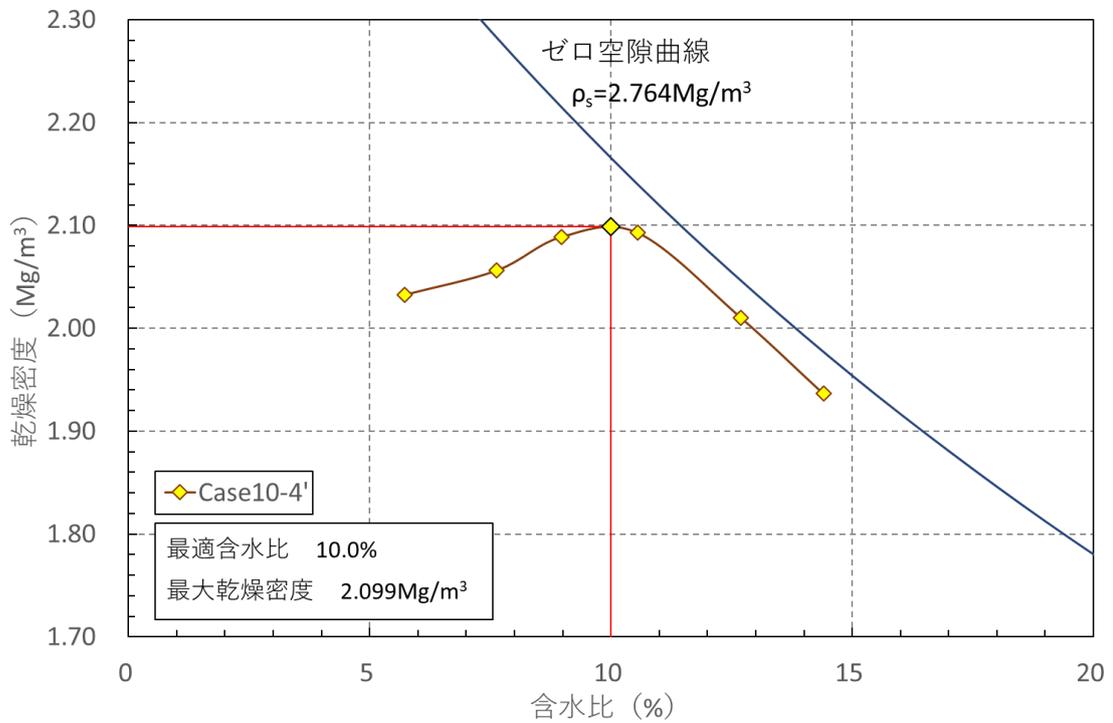


図 5.2-51 締固め試験結果

(Case10-4' ; 粗粒砂岩 20%、碎石 40%、碎砂 30%、津軽 2 号 10%)

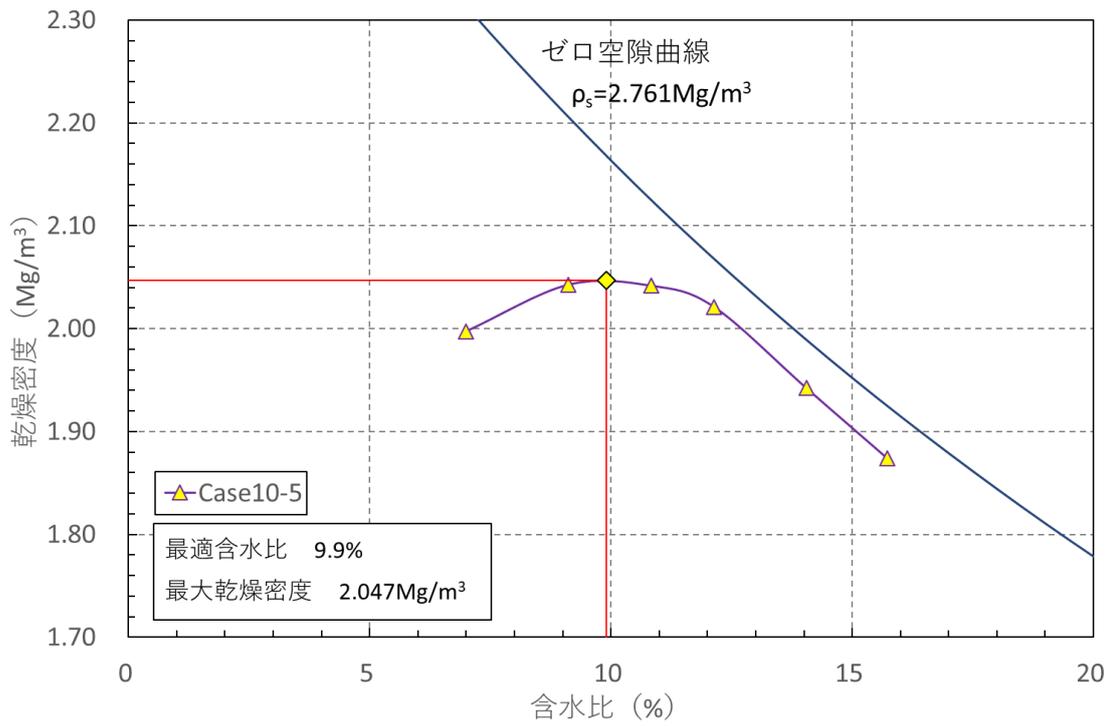


図 5.2-52 締固め試験結果

(Case10-5 ; 粗粒砂岩 30%、碎石 35%、碎砂 25%、津軽 2 号 10%)

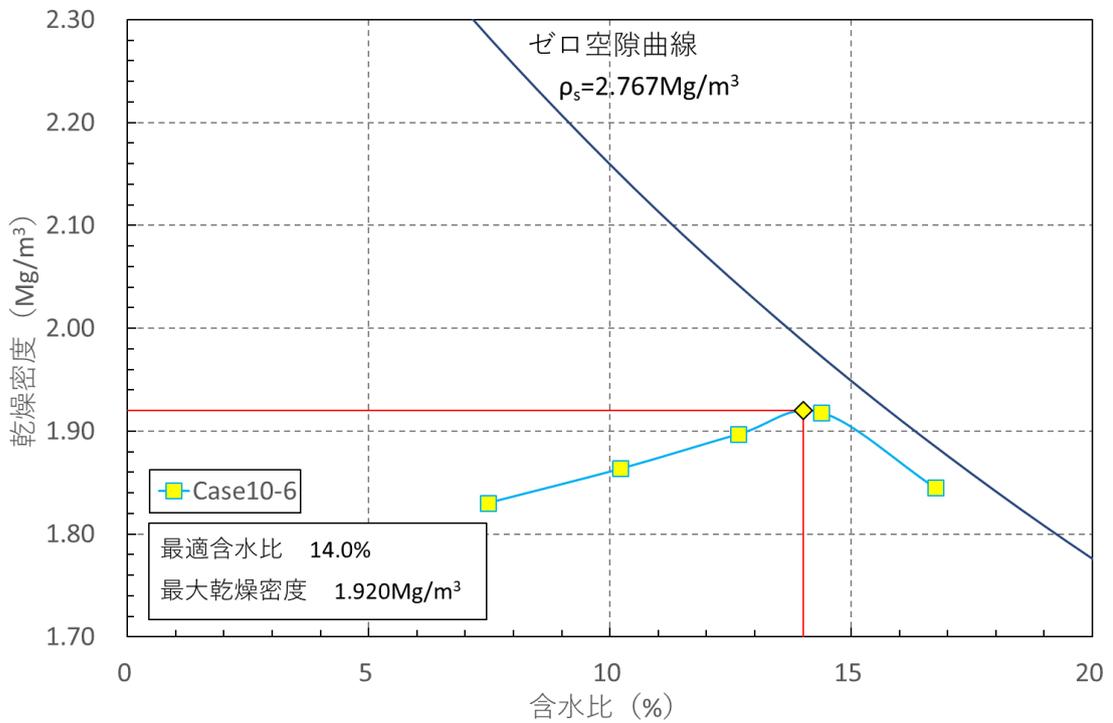


図 5.2-53 締固め試験結果

(Case10-6 ; 粗粒砂岩 55%、碎石 20%、碎砂 15%、津軽 2 号 10%)

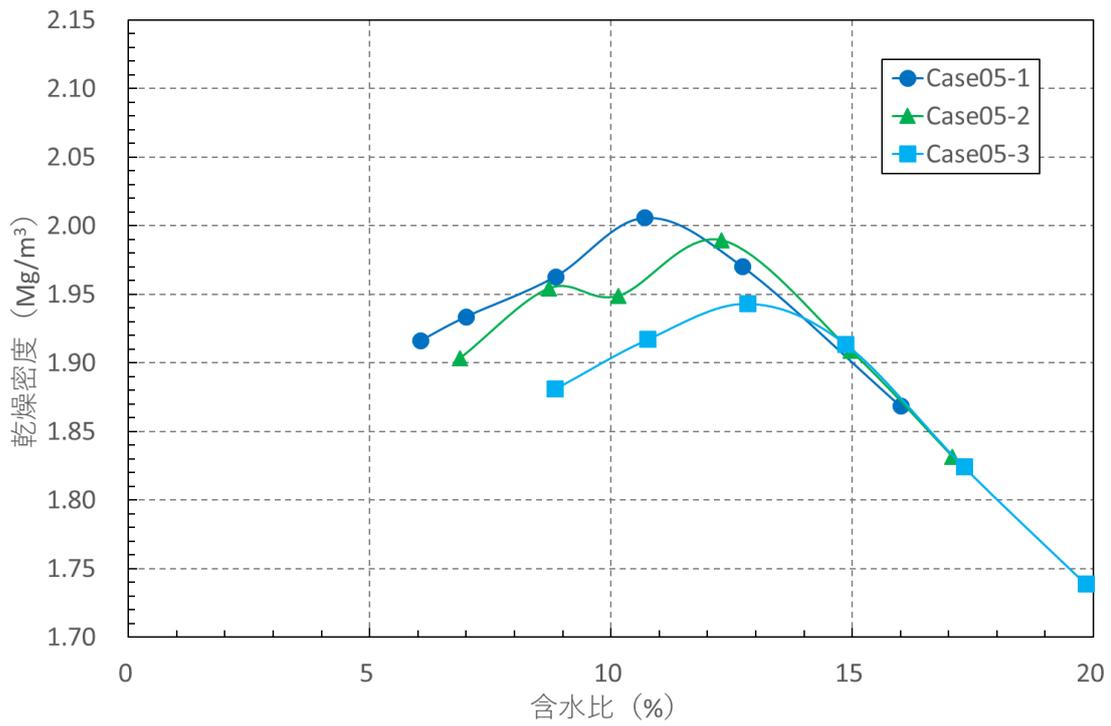


図 5.2-54 締固め曲線の比較 (Case05-1~Case05-3)

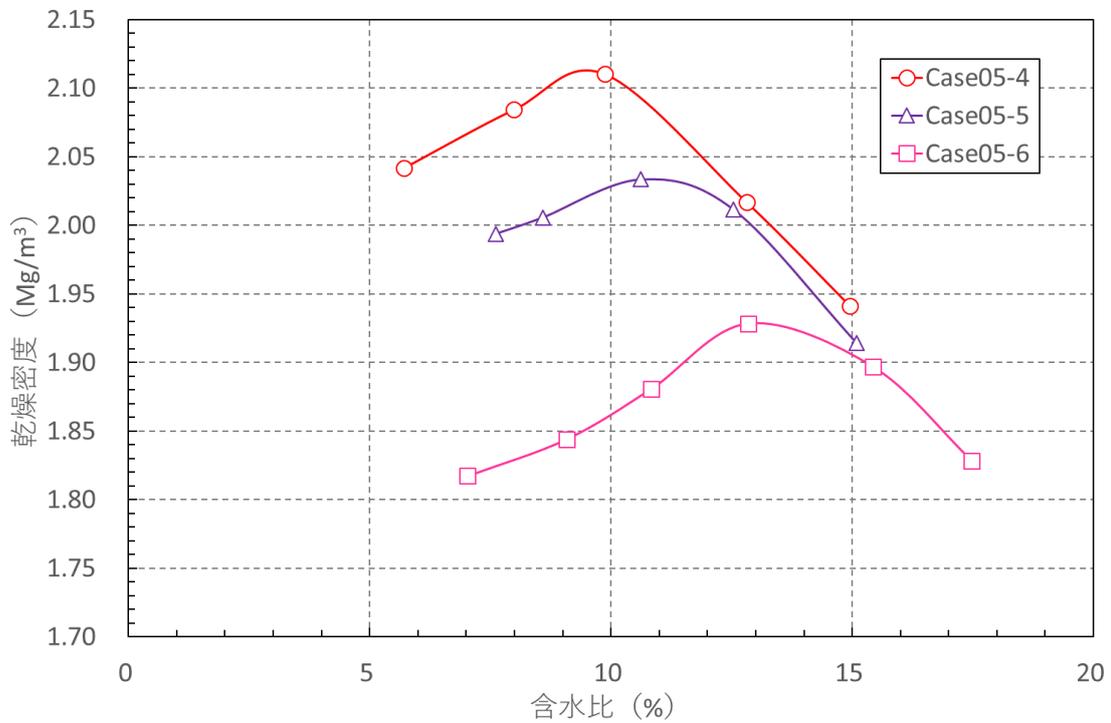


図 5.2-55 締固め曲線の比較 (Case05-4~Case05-6)

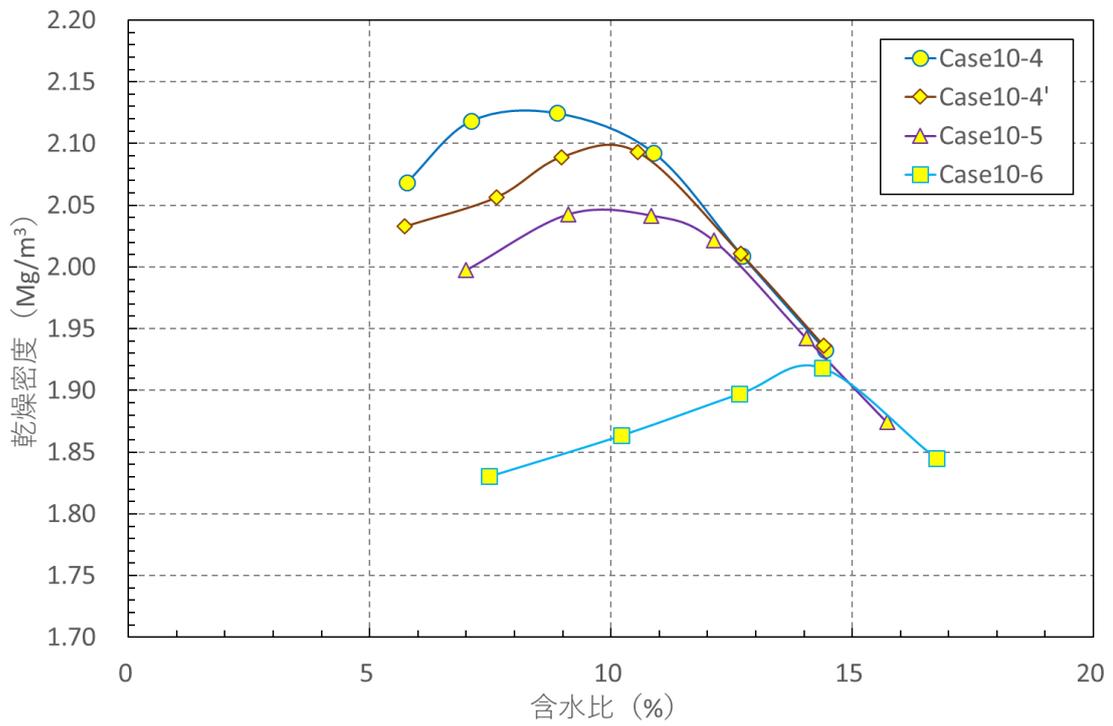


図 5.2-56 締固め曲線の比較 (Case10-4~Case10-6)

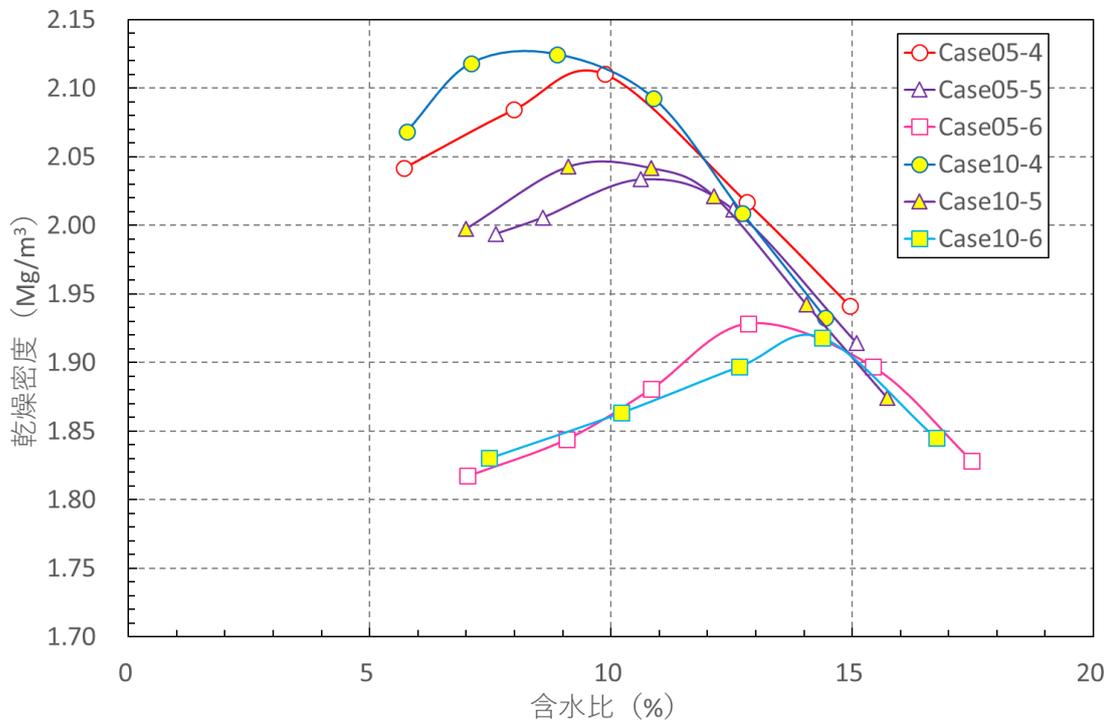


図 5.2-57 締固め曲線の比較 (ベントナイト混合率が5%のときと10%の時の比較)

(4) 試験結果

① 透水試験

透水試験のケースを表 5.2-10 に示す。Case05-4、Case05-6、Case10-1、Case10-4、Case10-5、Case10-6 に対して透水試験を実施した。供試体の初期含水比は締固め試験における最適含水比とし、乾燥密度は最大乾燥密度の 95% (C 値=95%) とした。また、ベントナイトのうちのモンモリロナイトのみが溶解したケースも設定した。ベントナイトのモンモリロナイト以外の部分に関してはカオリンを混合した。

透水試験の結果を図 5.2-58 に示す。透水係数と乾燥密度の関係である。同図には 2015 年度の検討で実施した粗粒砂岩 50%、ベントナイト (クニゲル U) 10%、碎石 (石灰岩碎石 2005) 40% を混合した材料での透水試験結果も示している。また、Step1 の結果も合わせて示している。なお、図中の線は各ケースの設定乾燥密度であり、赤線が Case05-6、青線が Case05-4 で、それぞれ実線がベントナイト混合材料、破線がカオリン混合材料である。Case05-6 に比べて Case05-4 の方が乾燥密度は大きい、得られる透水係数の値は大きくなっている。また、モンモリロナイトが溶解したことを想定してベントナイトの代わりにカオリンを混合した場合についての透水係数の上昇割合は、Case05-6 に比べて Case05-4 の方が小さい。Case05-6 は 3 オーダー程度大きくなっているが、Case05-4 の上昇は 1 オーダー程度である。

ベントナイトが 5% の時に比べると得られる透水係数は 1 オーダー程度小さくなっている。ただし、カオリンを混合した場合の透水係数の上昇割合はベントナイトの混合率が 5% 設定の時より大きくなっている。Case05-4-2 と Case10-4-2 は同程度の透水係数となっている (Case05-4-1 と Case10-4-1 では Case10-4-1 の方が 1 オーダー程度小さい) が、Case05-6-2 と Case10-6-2 では Case10-6-2 の方が透水係数は大きい (Case05-6-1 と Case10-6-1 では Case10-6-1 の方が 1 オーダー程度小さいにも係わらず)。

図 5.2-59、図 5.2-60、図 5.2-61 はそれぞれ、透水係数と間隙率、有効粘土密度、有効粘土間隙比の関係で整理した図である。有効粘土密度および有効粘土間隙比で整理すると、ベントナイト、カオリンに関係なく、透水係数と有効粘土密度あるいは有効粘土間隙比に相関がみられる。ただし、Case05-6-1 およびカオリンを混合した Case05-6-2、Case10-4-2 は他の配合と異なる相関となっている。

表 5.2-10 下部覆土の透水試験ケース (Step2)

Case	混合率 (%)					C 値 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)
	粗粒砂岩	津軽2号	カオリン	玄武岩				
				碎石	砕砂			
Case05-4-1	20	5	—	45	30	95	2.008	9.5
Case05-4-2	20	—	3.2	45	30	95	1.972	9.5
Case05-6-1	60	5	—	20	15	95	1.833	13.1
Case05-6-2	60	—	3.2	20	15	95	1.800	13.1
Case10-4-1	15	10	—	45	30	95	2.021	8.0
Case10-4-2	15	—	6.4	45	30	95	1.948	8.0
Case 10-4'-1	20	10	—	40	30	95	1.994	10.0
Case10-5-1	30	10	—	35	25	95	1.945	9.9
Case10-6-1	55	10	—	20	15	95	1.824	14.0
Case10-6-2	55	—	6.4	20	15	95	1.758	14.0

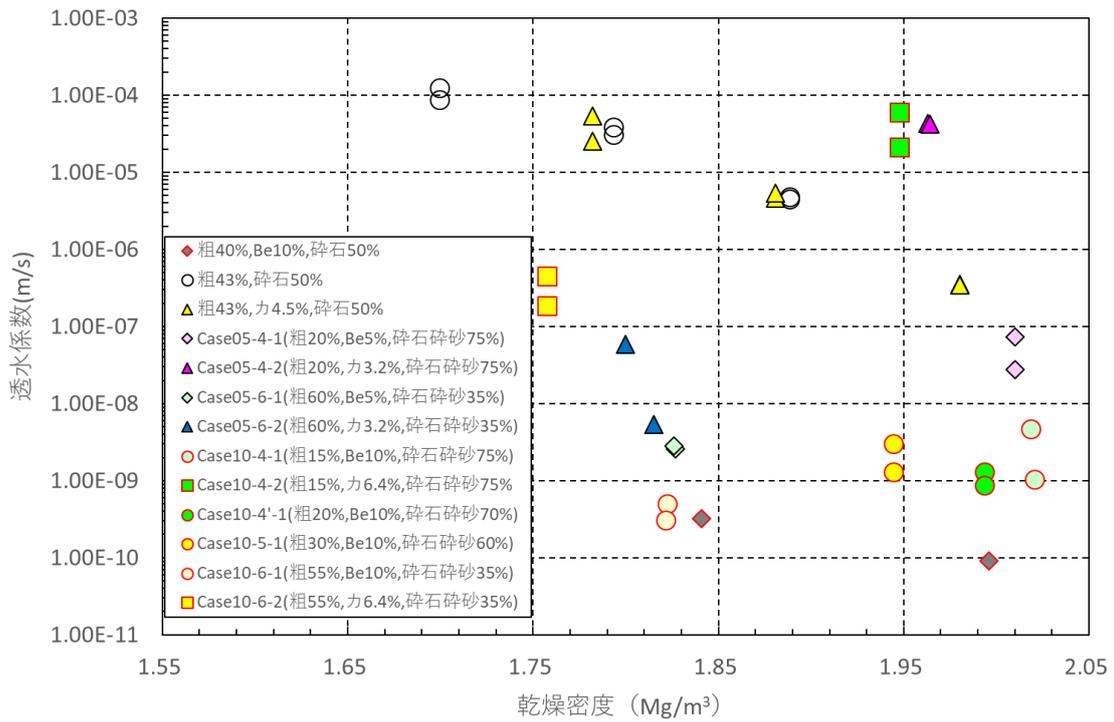


図 5.2-58 下部覆土 Step 2 の透水試験結果 (透水係数と乾燥密度の関係)

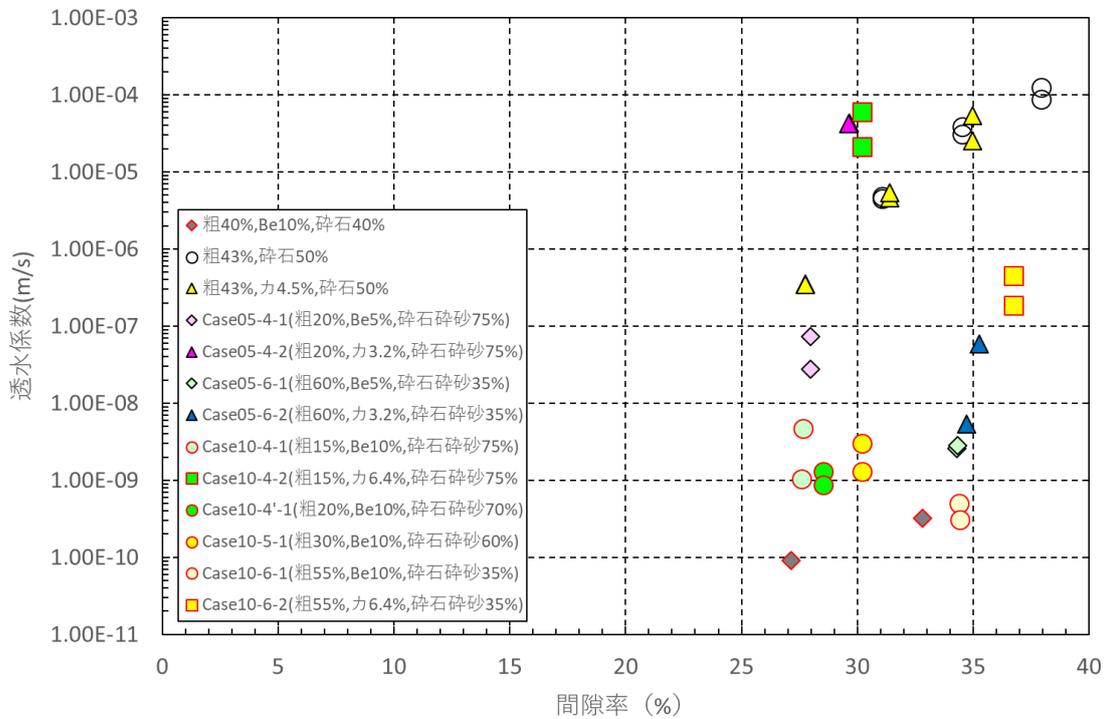


図 5.2-59 下部覆土 Step 2 の透水試験結果 (透水係数と間隙率の関係)

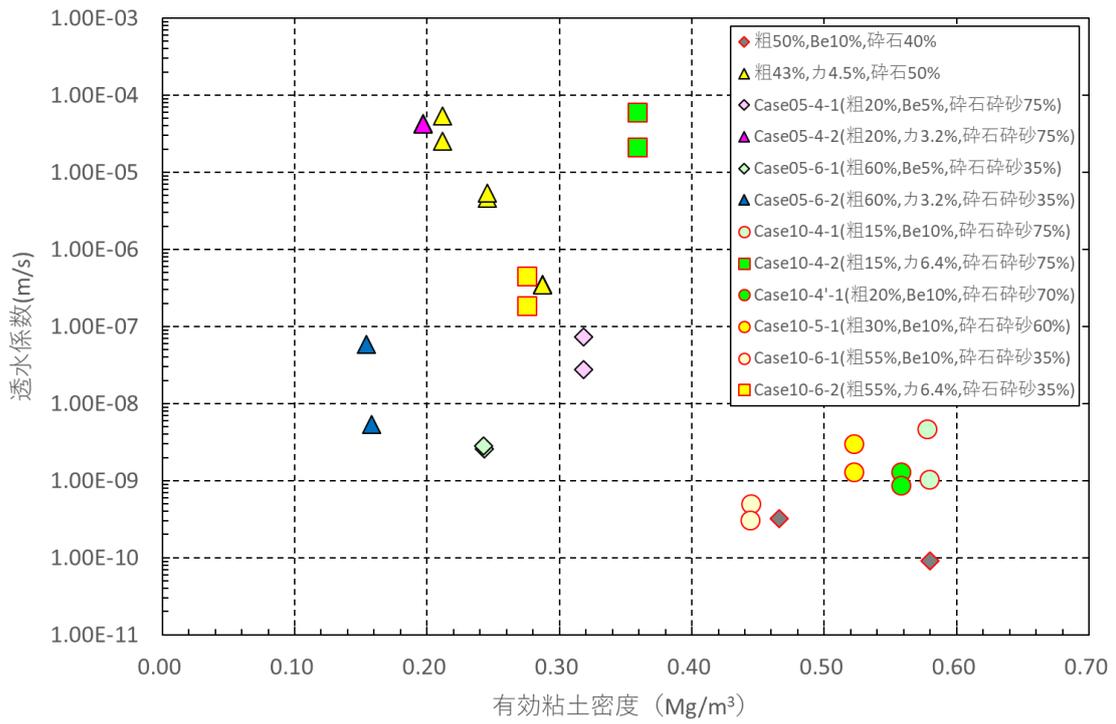


図 5.2-60 下部覆土 Step 2 の透水試験結果 (透水係数と有効粘土密度の関係)

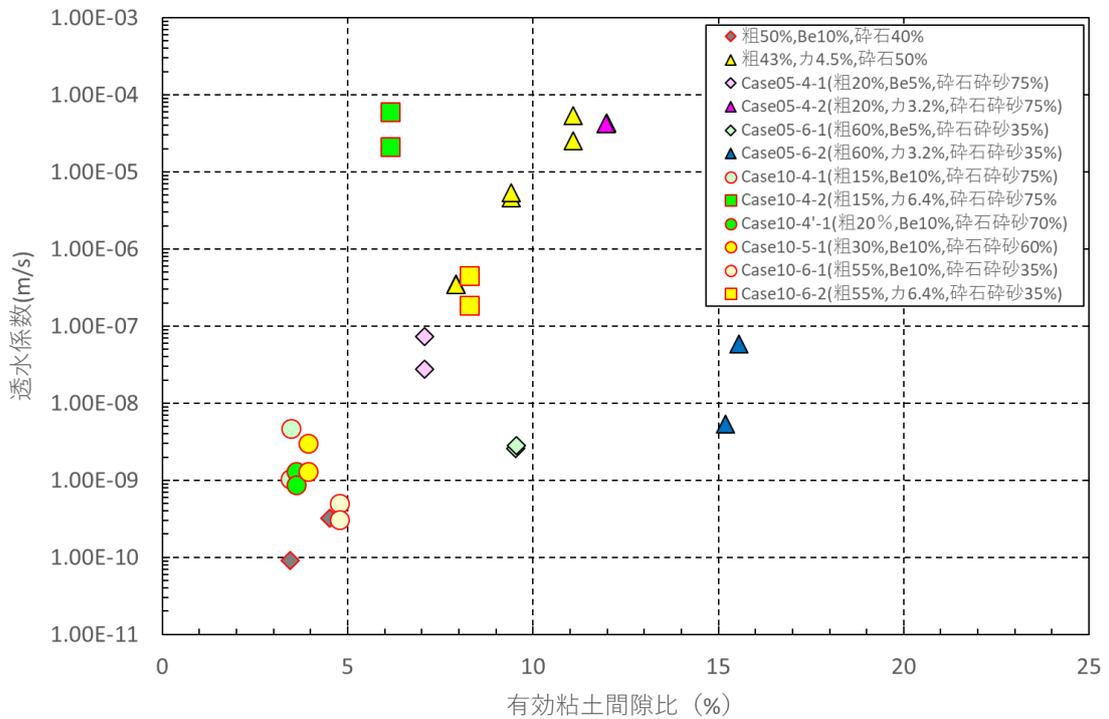


図 5.2-61 下部覆土 Step 2 の透水試験結果 (透水係数と有効粘土間隙比の関係)

② 三軸圧縮強度試験

下部覆土の材料を対象とした三軸圧縮試験の試験ケースを表 5.2-11 に示す。供試体のサイズは礫分が混合されているので直径 100mm、高さ 200mm とした。

表 5.2-11 下部覆土の三軸圧縮強度試験ケース (Step2)

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)		
	粗粒砂岩	津軽 2号	玄武岩					
			碎石	碎砂				
Case05-1	45	5	40	10	95	100	200	400
Case05-2	45	5	30	20	95	100	200	400
Case05-3	45	5	15	35	95	100	200	400
Case05-4	20	5	45	30	95	100	200	400
Case05-5	35	5	35	25	95	100	200	400
Case05-6	60	5	20	15	95	100	200	400
Case10-4	15	10	45	30	95	100	200	400
Case 10-5-1	30	10	35	25	95	100	200	400
Case 10-5-2	30	10	35	25	95	100	200	400
Case10-6	55	10	20	15	95	100	200	400

<ベントナイト混合率5%の場合>

Case05-1～Case05-6の100kPaのみの軸差応力～軸ひずみ関係を図5.2-62に示す。礫分である玄武岩の砕石の混合率が高いケースでは、載荷途中で階段状に軸差応力が低下することが観察された。これは負のダイレイタンスではなく、圧縮過程で礫同士のかみ合わせ状態が変化することによるものと考えられる。また、どのケースも間隙水圧が最終的に負圧となることにより、軸圧縮過程でのダイレイタンスにより供試体内にサクシオンが発生することに起因すると考えられる。軸差応力が最も高くなったケースはCase05-4であった。

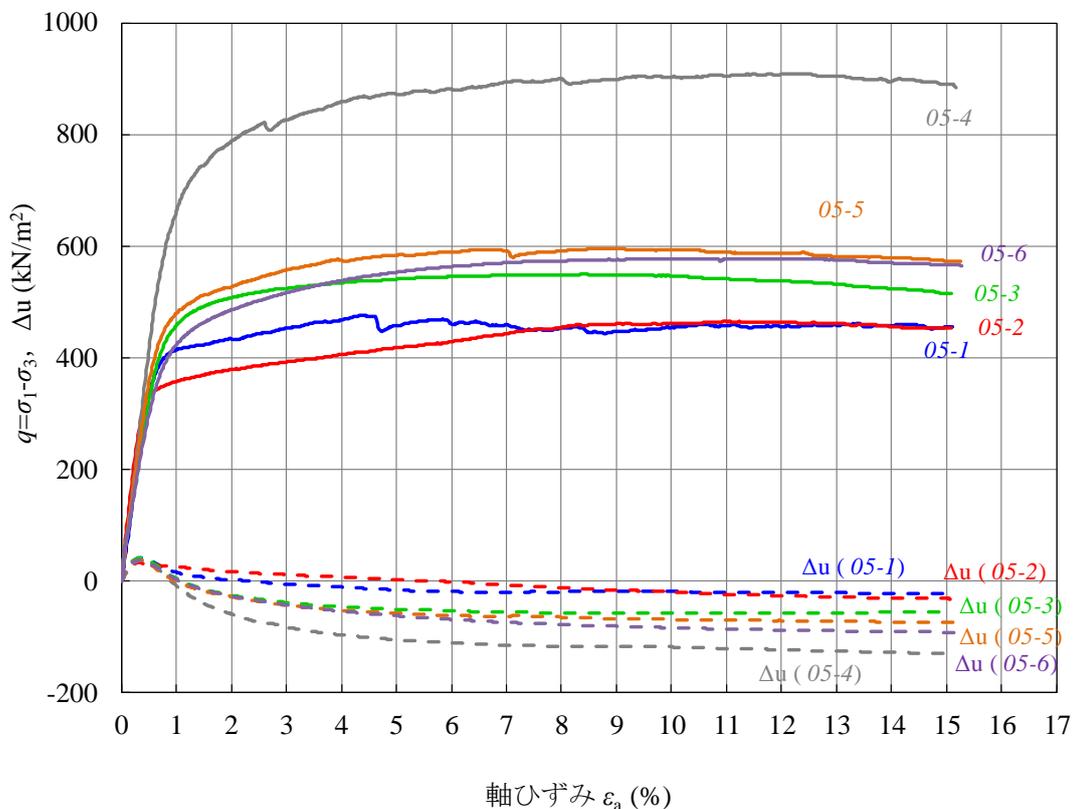


図 5.2-62 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-1～05-6、100kPa のみ)

次に、Case05-1～Case05-6の軸差応力～軸ひずみ関係、モール・クーロンの応力円、主応力比～軸ひずみ関係、主応力経路、軸差応力～平均主応力関係をそれぞれ作成した。その結果を図5.2-63～図5.2-92に示す。図5.2-64、図5.2-69、図5.2-74、図5.2-79、図5.2-84、図5.2-89に示したモール・クーロンの応力円、図5.2-66、図5.2-71、図5.2-76、図5.2-81、図5.2-86、図5.2-91に示した主応力経路、図5.2-67、図5.2-72、図5.2-77

図 5.2-82、図 5.2-87、図 5.2-92 に示した軸差応力～平均主応力関係より有効応力を元にした粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' 、限界状態パラメータ M を求めた。その結果を表 5.2-12 に示す。内部摩擦角 ϕ' はモール・クーロンの応力円から求めたものよりも主応力経路から求めたものの方が高めになった。粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' に関しては配合の違いによる明確な差異は見られなかったが、粗粒砂岩が多い方が強度定数は低下する傾向が見られる。限界状態パラメータ M は Case05-4 が最も大きくなった。

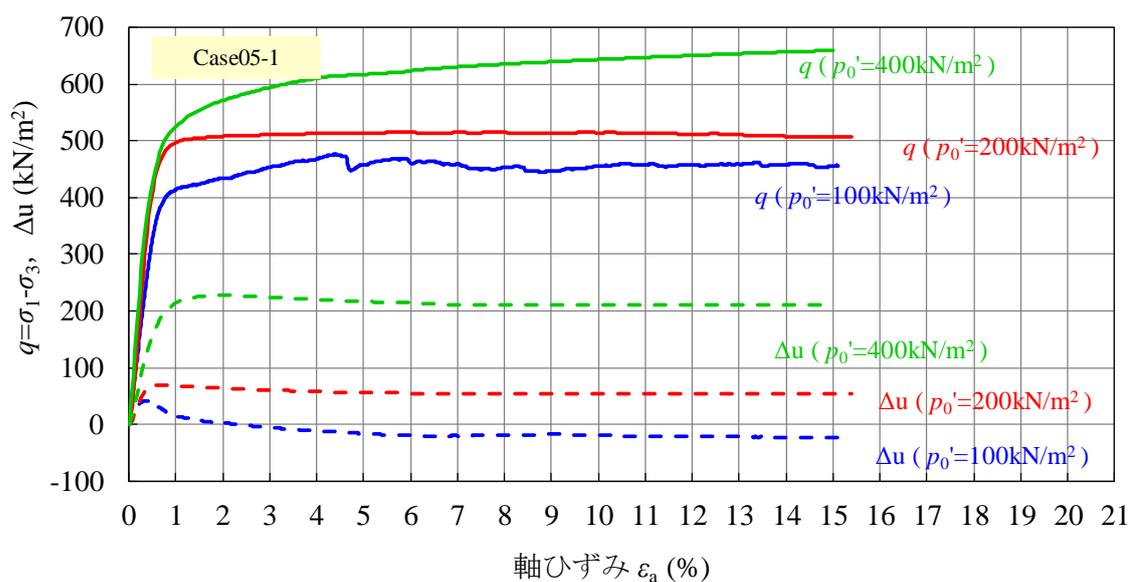


図 5.2-63 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-1)

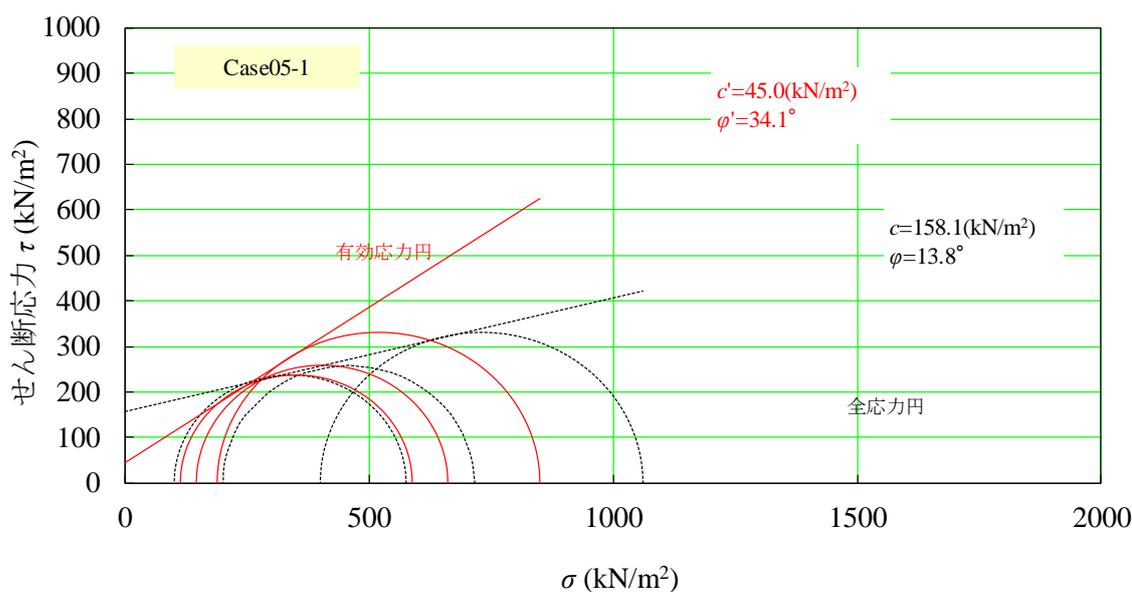


図 5.2-64 モール・クーロンの応力円 (Case05-1)

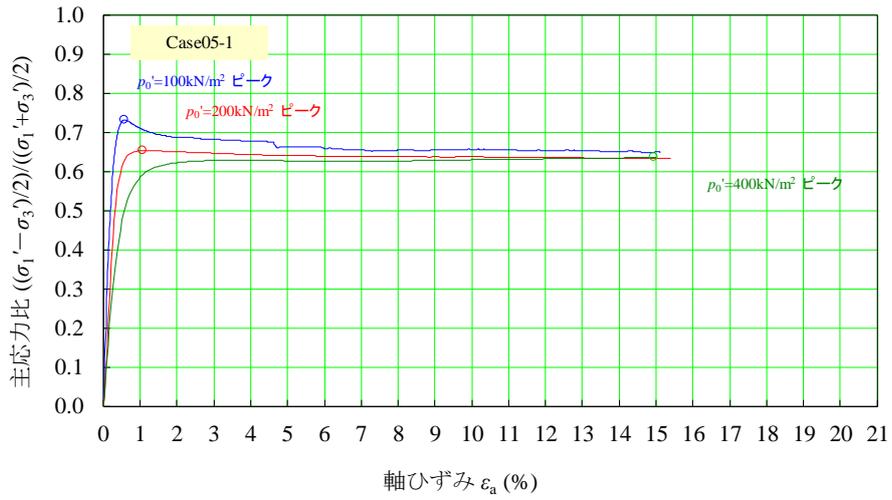


図 5.2-65 主応力比～軸差ひずみ関係 (Case05-1)

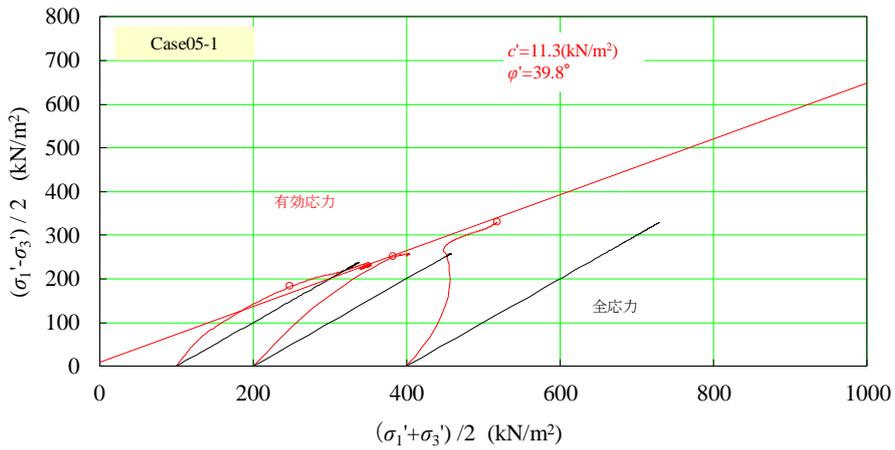


図 5.2-66 主応力経路 (Case05-1)

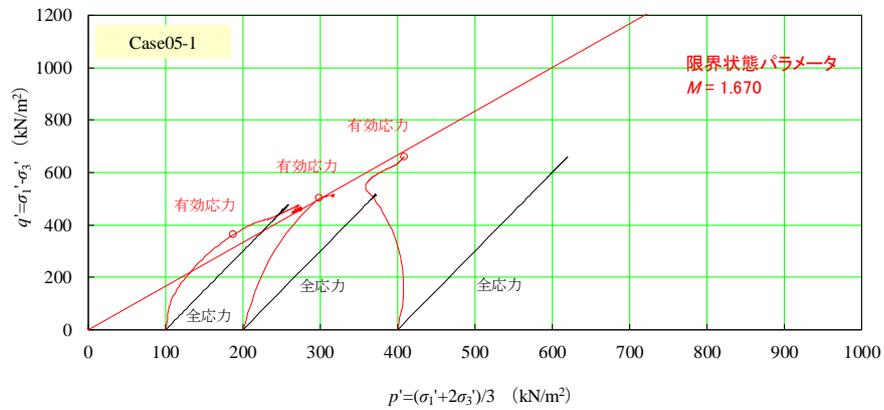


図 5.2-67 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-1)

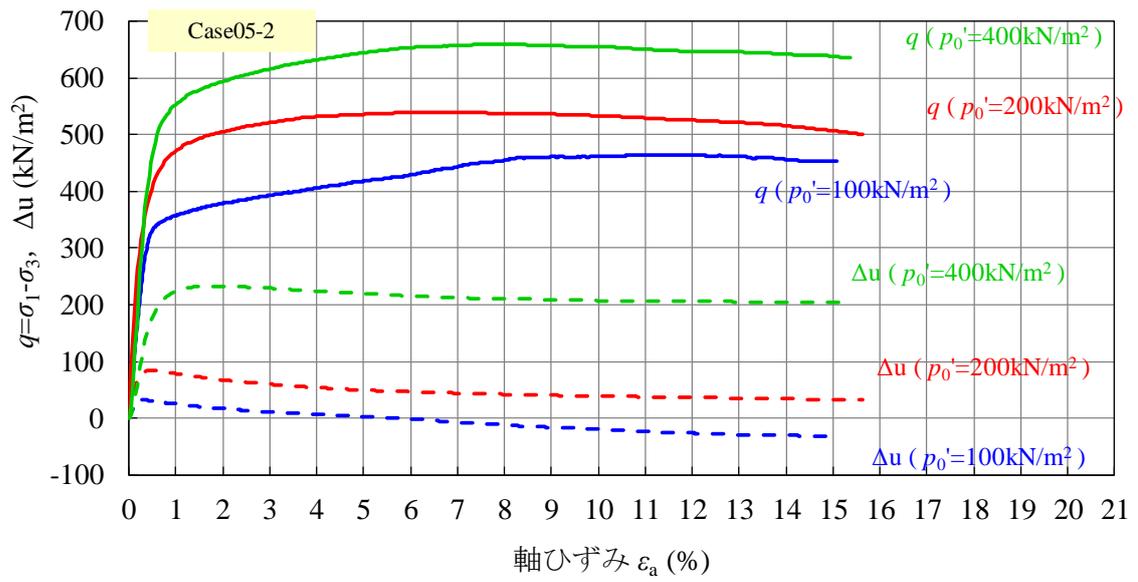


図 5.2-68 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-2)

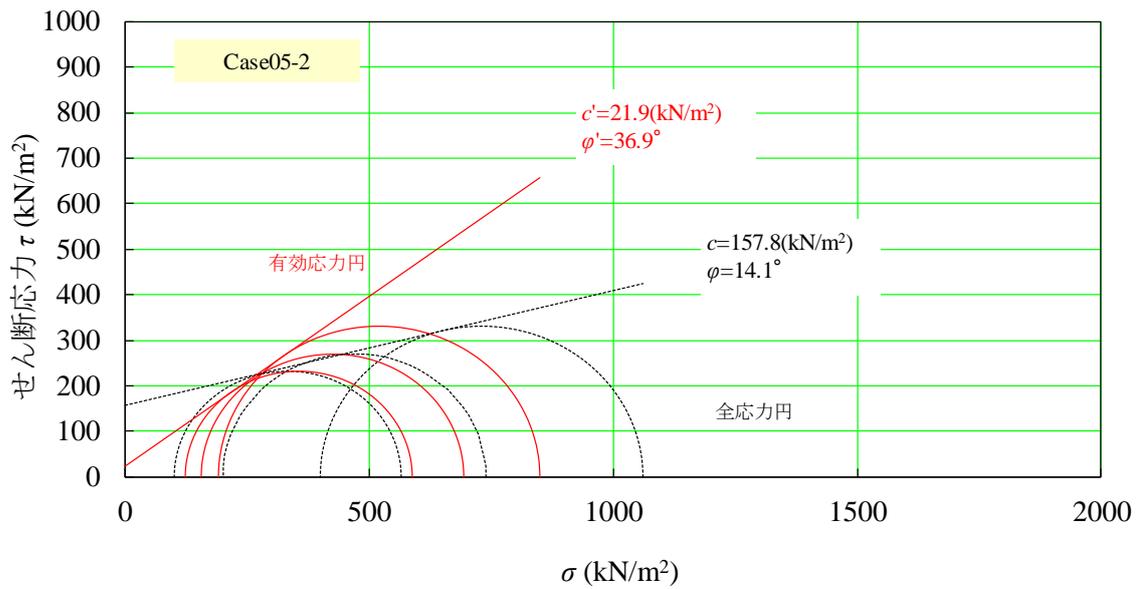


図 5.2-69 モール・クーロンの応力円 (Case05-2)

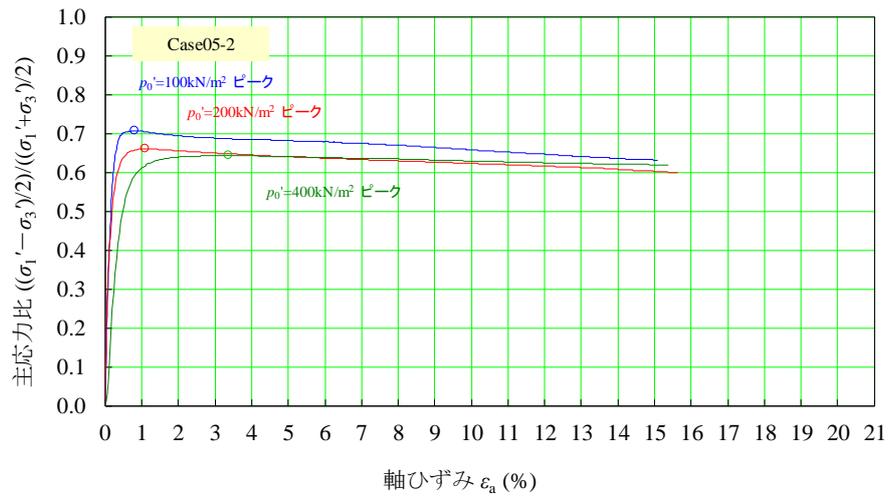


図 5.2-70 主応力比～軸差ひずみ関係 (Case05-2)

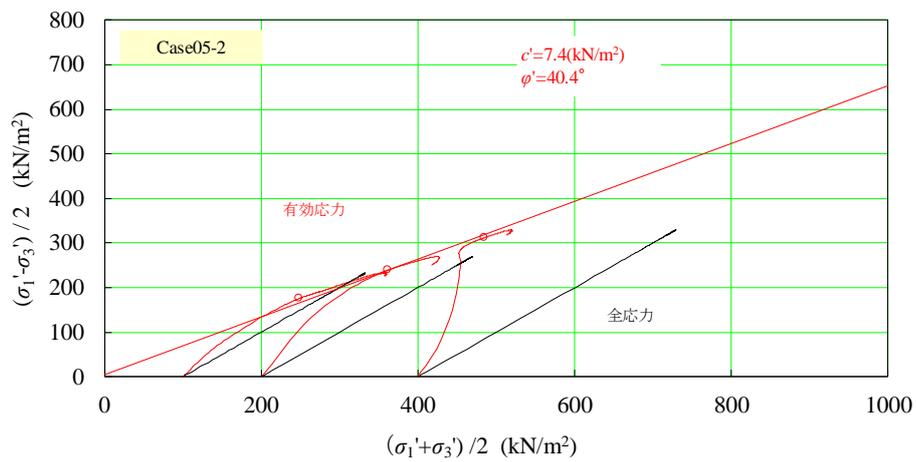


図 5.2-71 主応力経路 (Case05-2)

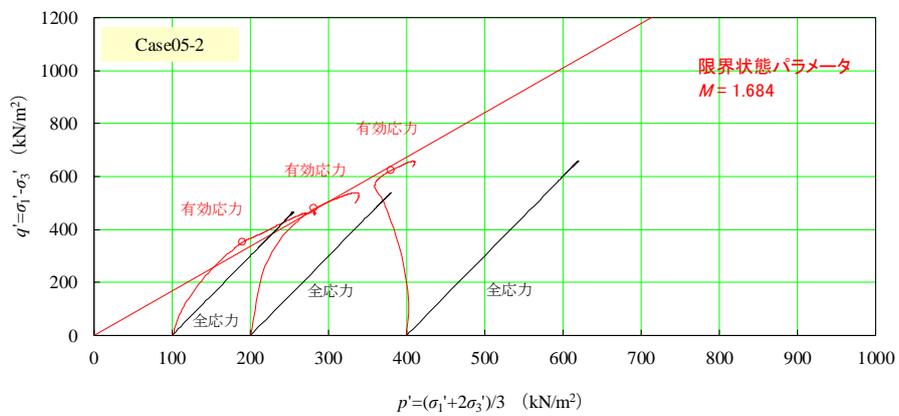


図 5.2-72 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-2)

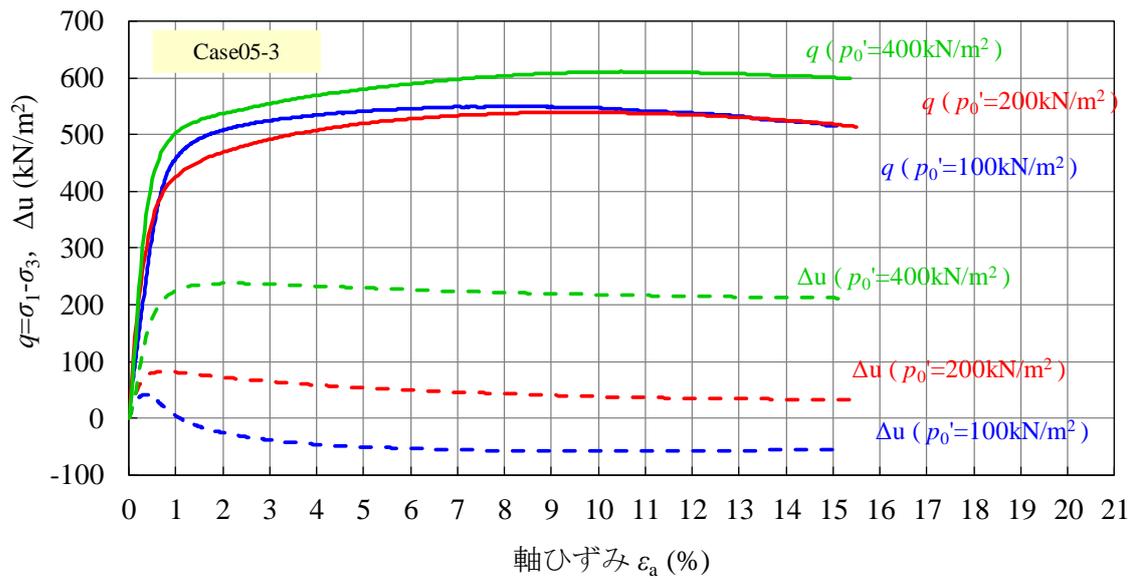


図 5.2-73 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-3)

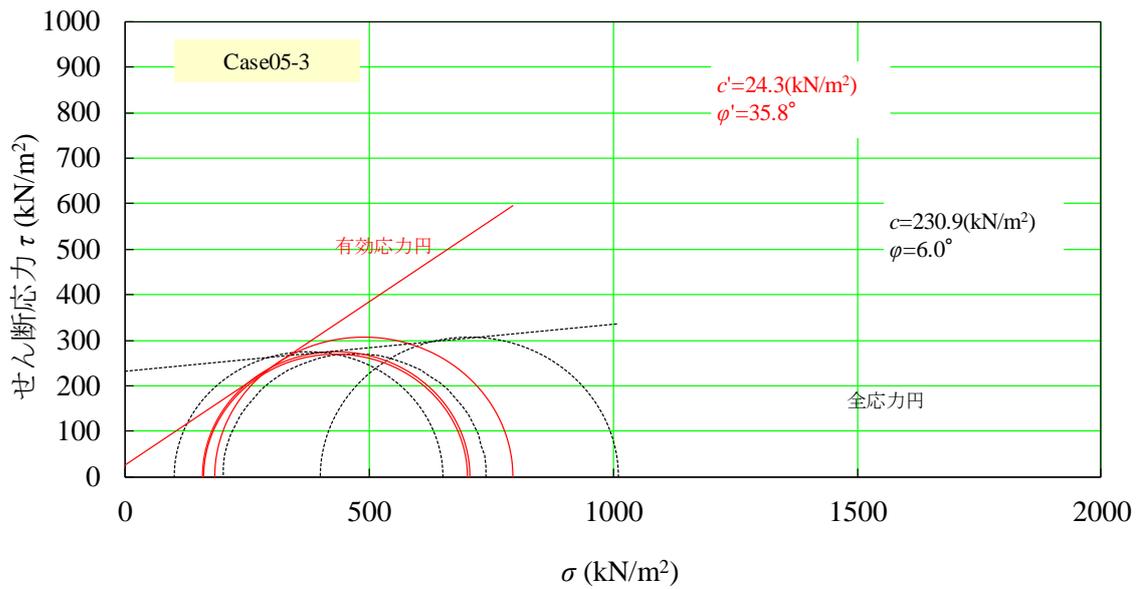


図 5.2-74 モール・クーロンの応力円 (Case05-3)

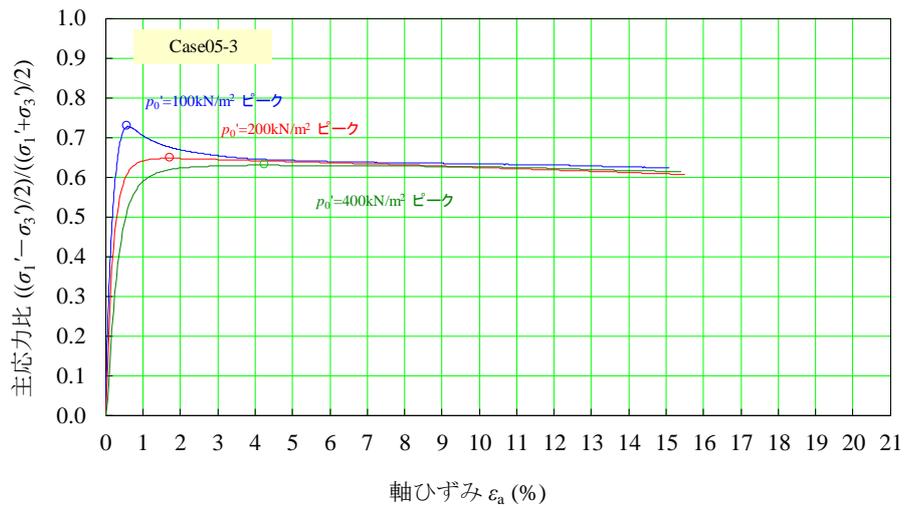


図 5.2-75 主応力比～軸差ひずみ関係 (Case05-3)

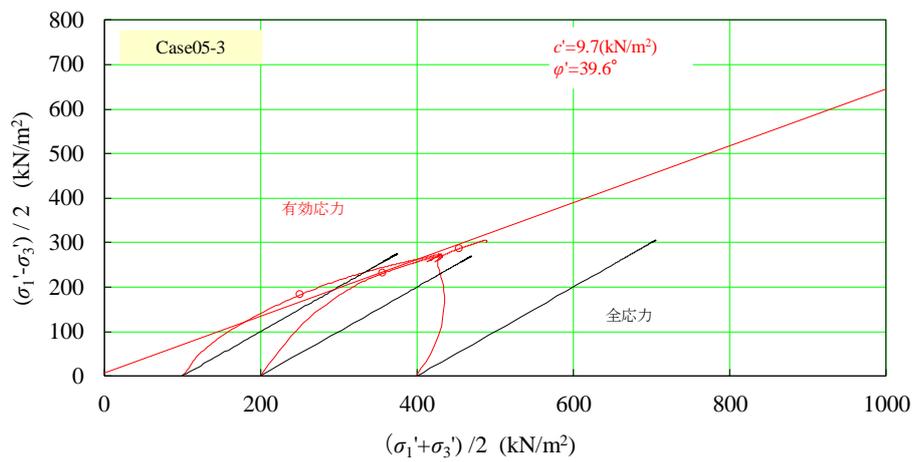


図 5.2-76 主応力経路 (Case05-3)

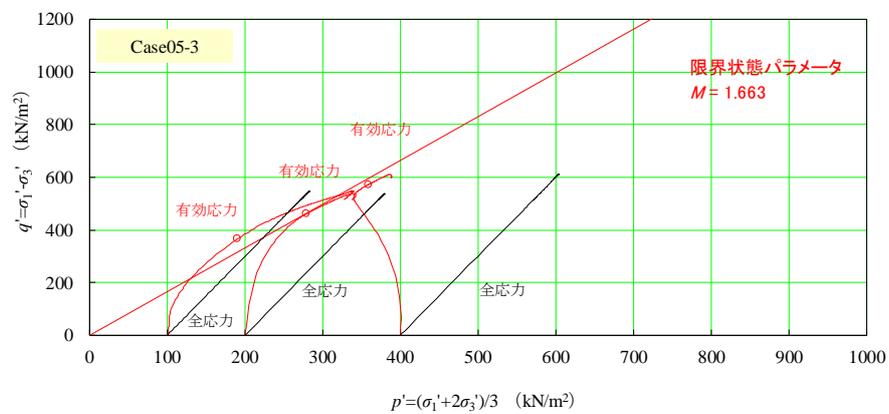


図 5.2-77 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-3)

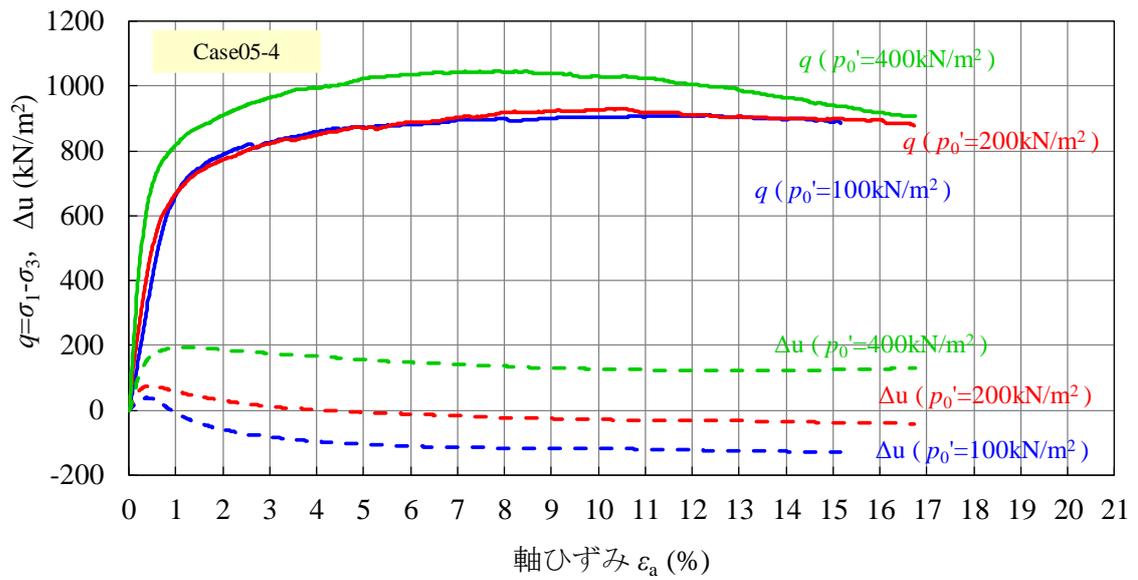


図 5.2-78 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-4)

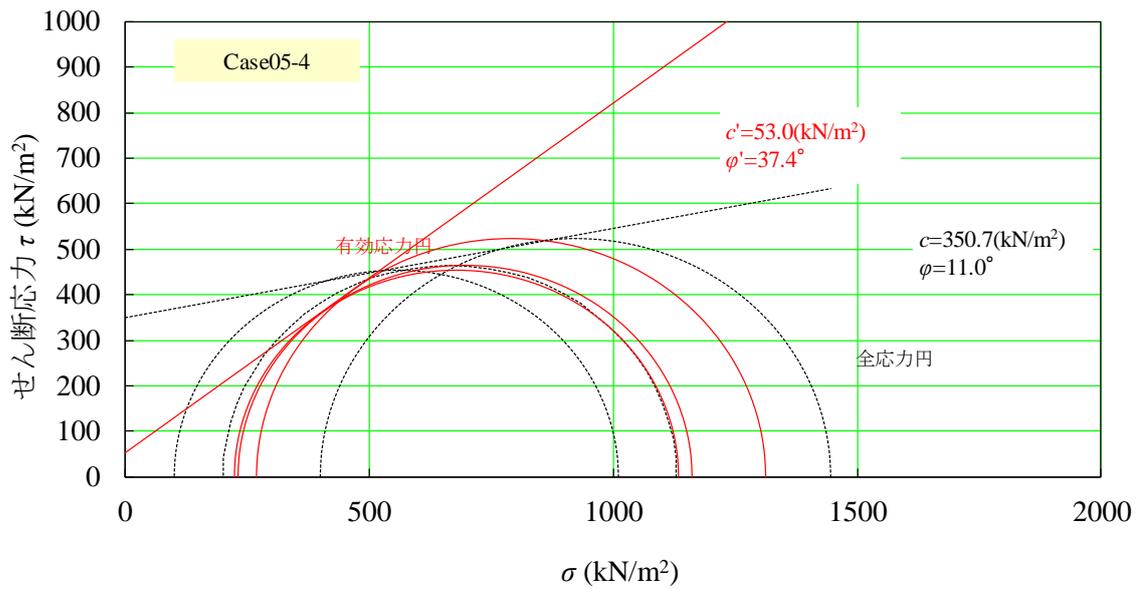


図 5.2-79 モール・クーロンの応力円 (Case05-4)

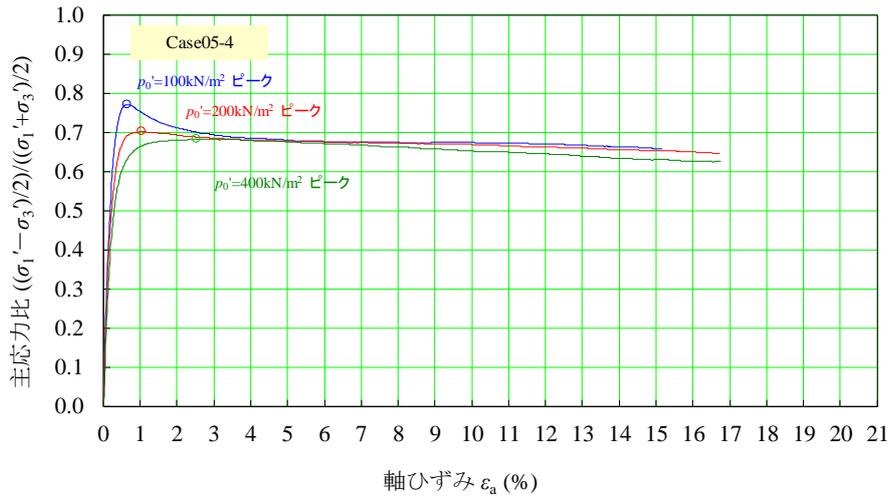


図 5.2-80 主応力比～軸差ひずみ関係 (Case05-4)

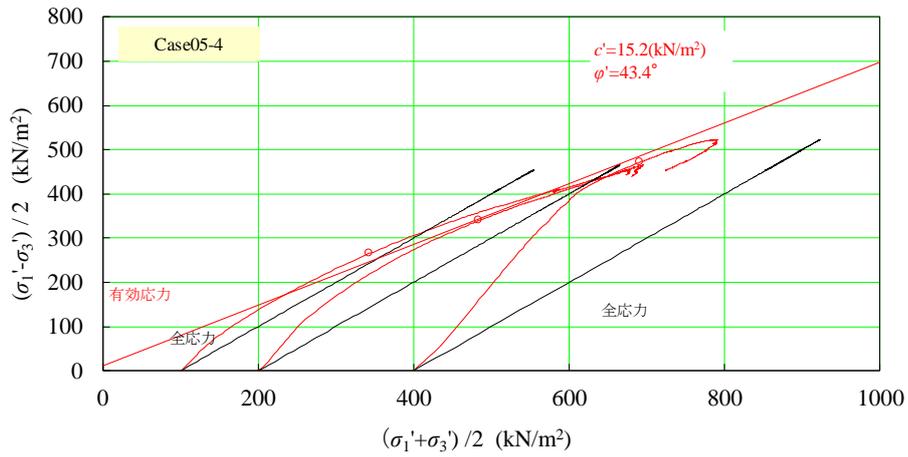


図 5.2-81 主応力経路 (Case05-4)

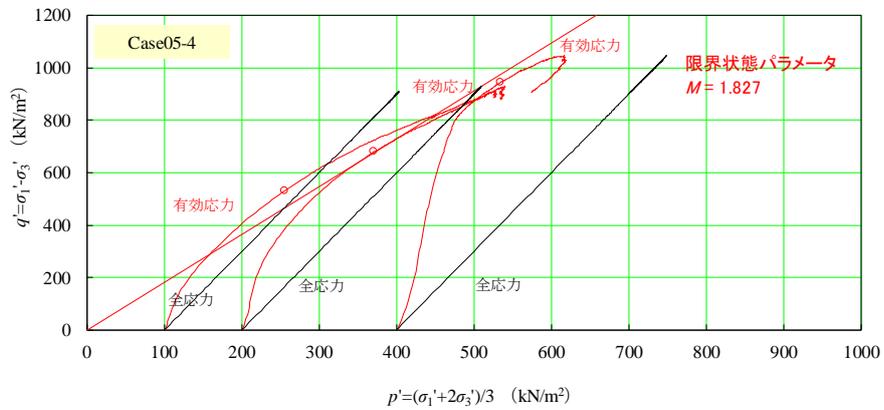


図 5.2-82 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-4)

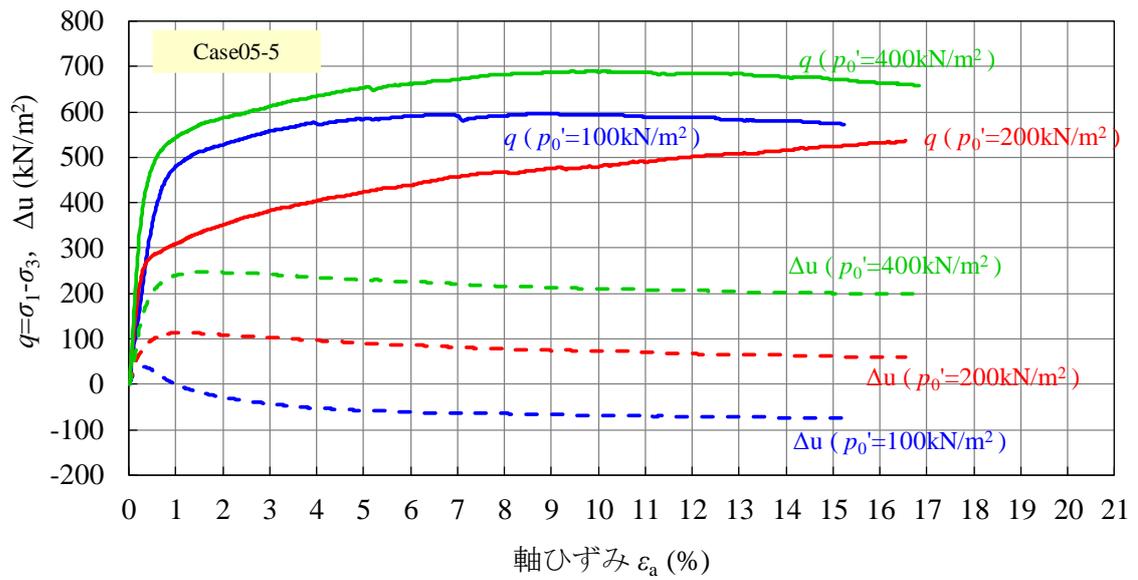


図 5.2-83 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-5)

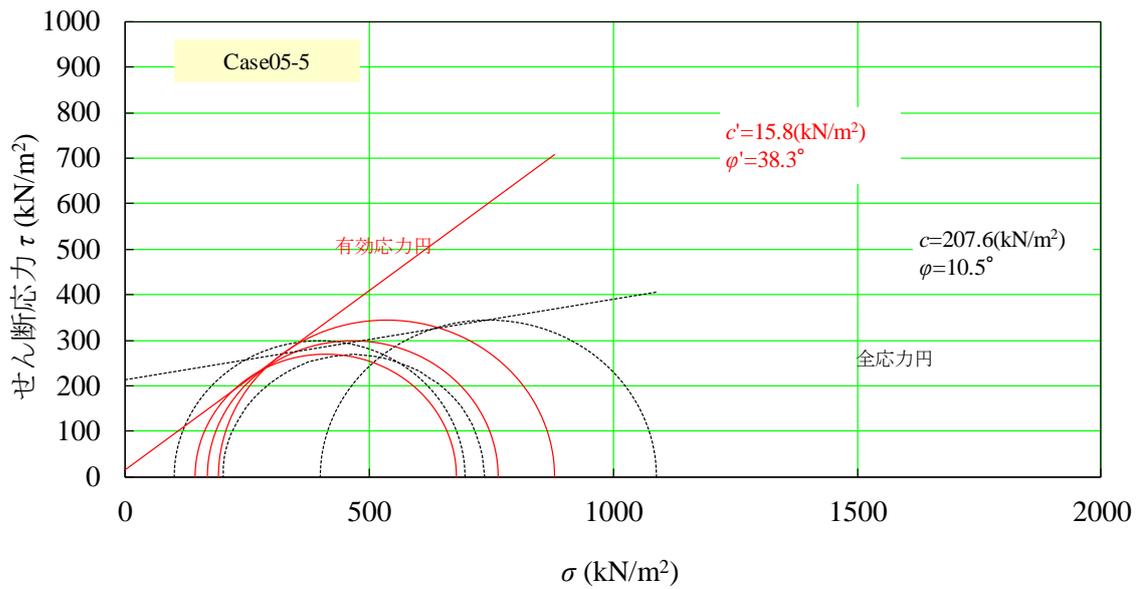


図 5.2-84 モール・クーロンの応力円 (Case05-5)

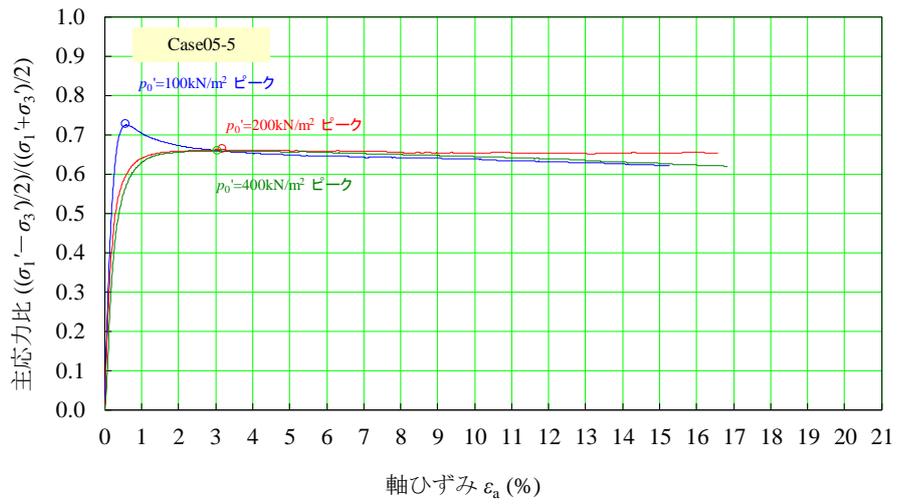


図 5.2-85 主応力比～軸ひずみ関係 (Case05-5)

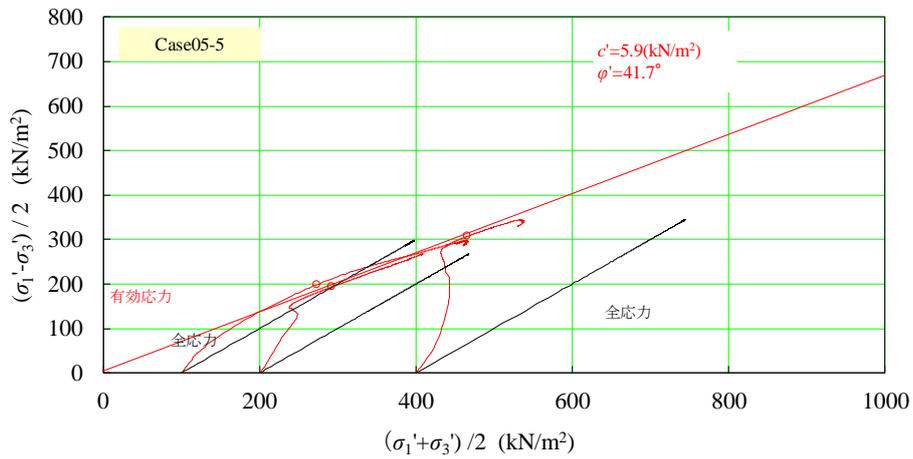


図 5.2-86 主応力経路 (Case05-5)

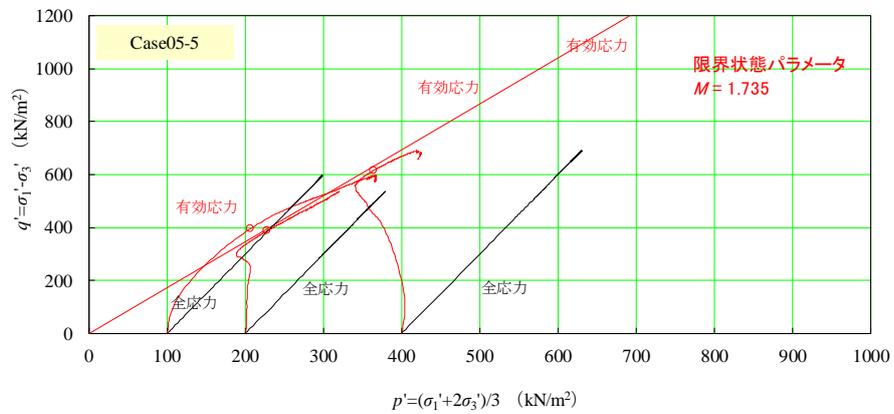


図 5.2-87 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-5)

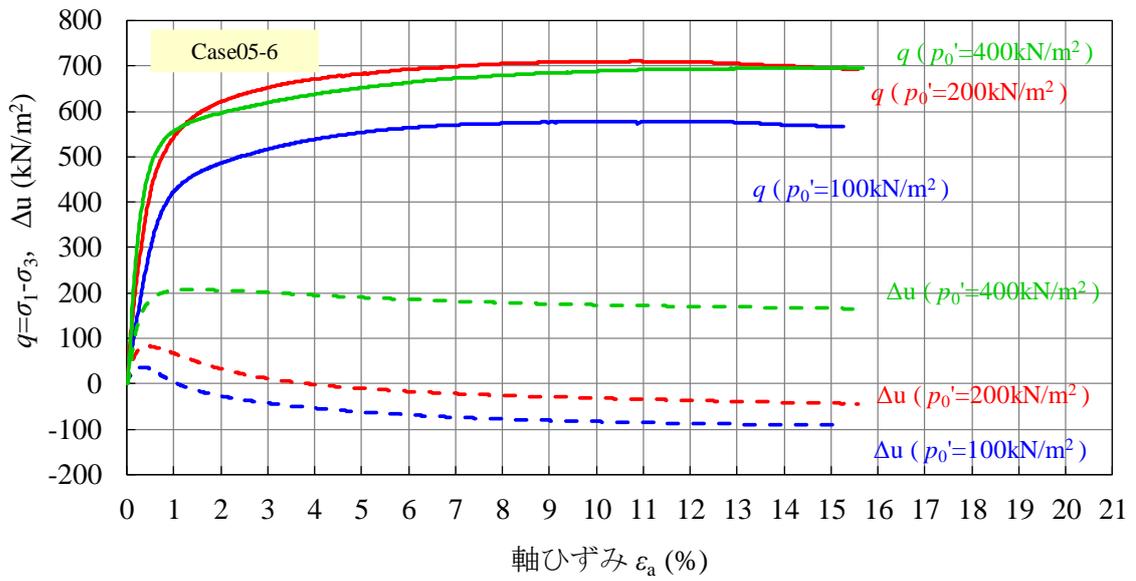


図 5.2-88 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case05-6)

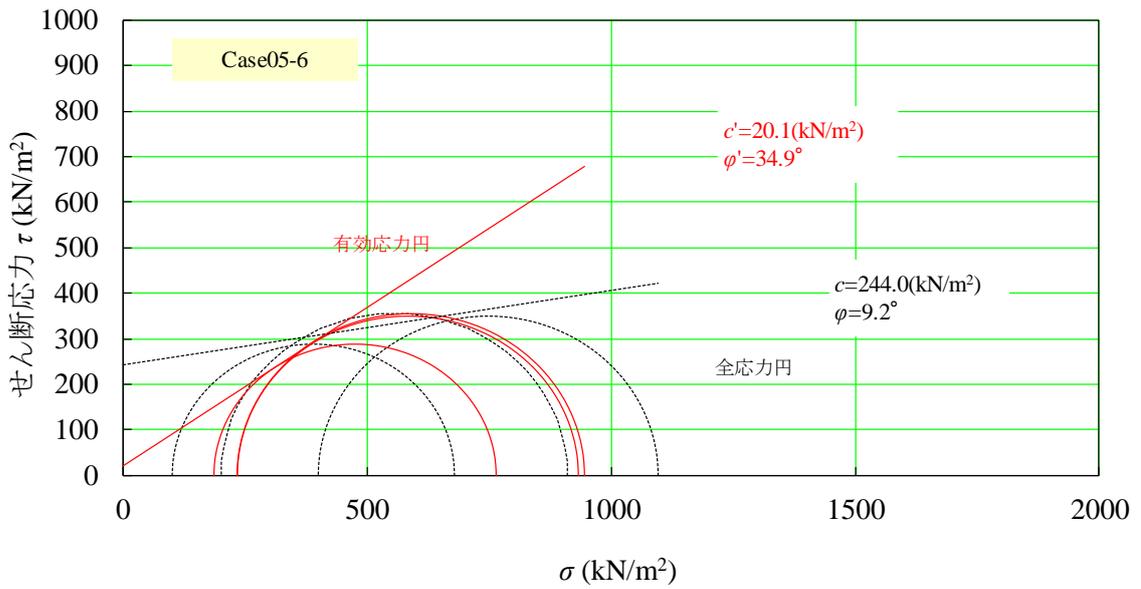


図 5.2-89 モール・クーロンの応力円 (Case05-6)

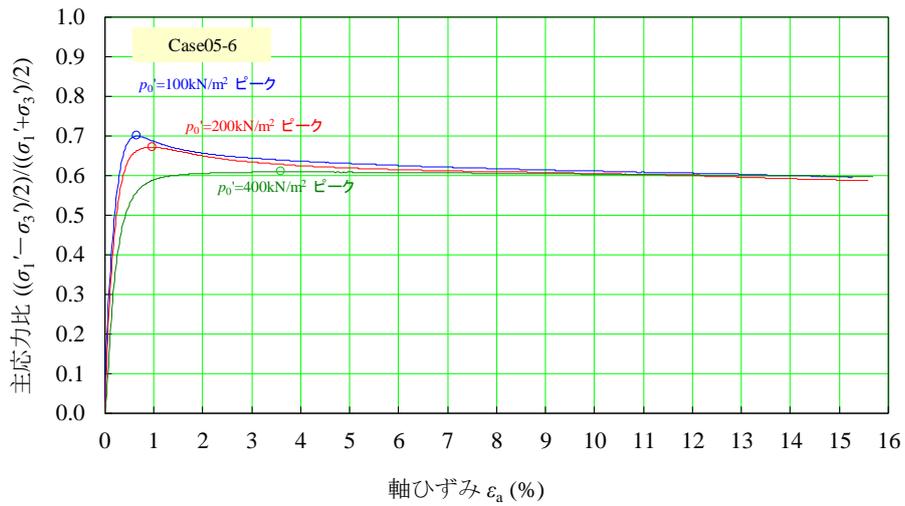


図 5.2-90 主応力比～軸差ひずみ関係 (Case05-6)

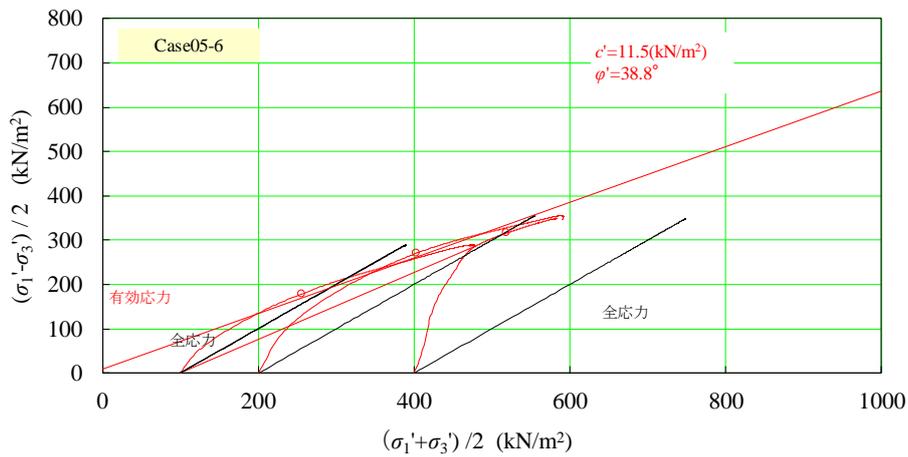


図 5.2-91 主応力経路 (Case05-6)

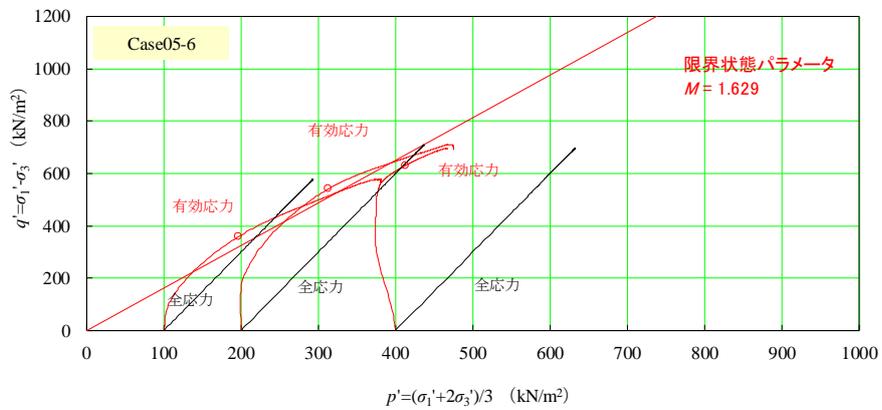


図 5.2-92 軸差応力～平均主応力関係 (Case05-6)

表 5.2-12 下部覆土の三軸圧縮強度試験結果 (Step2)

Case	混合率 (%)				モール応力円		主応力経路		限界状態 パラメータ
	粗粒 砂岩	津軽 2号	玄武岩		c' (MPa)	ϕ (deg)	c' (MPa)	ϕ' (deg)	
			碎石	砕砂					
Case05-1	45	5	40	10	43.5	34.3	11.3	39.8	1.670
Case05-2	45	5	30	20	22.3	36.8	7.4	40.4	1.684
Case05-3	45	5	15	35	25.1	35.7	9.7	39.6	1.663
Case05-4	20	5	45	30	53.0	37.4	15.2	43.4	1.827
Case05-5	35	5	35	25	15.8	38.3	5.9	41.7	1.735
Case05-6	60	5	20	15	20.1	34.9	11.5	38.8	1.629

<ベントナイト混合率10%の場合>

Case10-4~Case10-6の100kPaのみの軸差応力~軸ひずみ関係を図5.2-93に示す。礫分である玄武岩の碎石の混合率が高いCase10-4では、載荷途中で階段状に軸差応力が低下することが観察された。また、Case10-4~Case10-6でも間隙水圧が最終的に負圧となることより、軸圧縮過程でのダイレイタンスーにより供試体内にサクシオンが発生することに起因すると考えられる。軸差応力が最も高くなったケースはCase10-4であった。

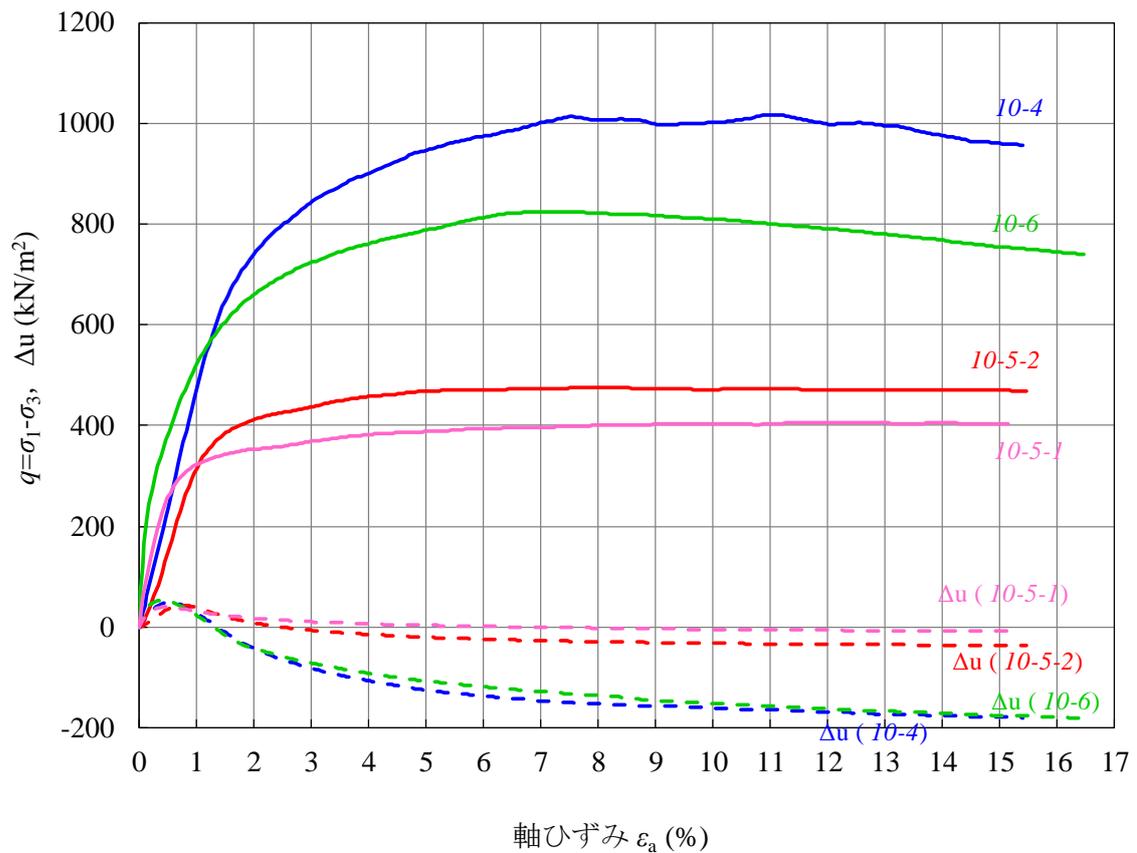


図 5.2-93 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-4～Case10-6)

次に、Case10-4～Case10-6 の軸差応力～軸ひずみ関係、モール・クーロンの応力円、主応力比～軸ひずみ関係、主応力経路、軸差応力～平均主応力関係をそれぞれ作成した。その結果を図 5.2-94～図 5.2-113 に示す。図 5.2-95、図 5.2-100、図 5.2-105、図 5.2-110 に示したモール・クーロンの応力円、図 5.2-97、図 5.2-102、図 5.2-107、図 5.2-112 に示した主応力経路、図 5.2-98、図 5.2-103 図 5.2-108、図 5.2-113 に示した軸差応力～平均主応力関係より有効応力を元にした粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' 、限界状態パラメータ M を求めた。その結果を表 5.2-13 に示す。内部摩擦角 ϕ' はモール・クーロンの応力円で求めたものよりも主応力経路から求めたものの方が高めになった。粘着力 c' は大小関係に関する傾向が見られなかった。内部摩擦角 ϕ' に関しては礫の配合率が最も高い Case10-4 が最も高くなったが配合の違いによる差は小さかった。限界状態パラメータも Case10-4 が最も大きくなった。

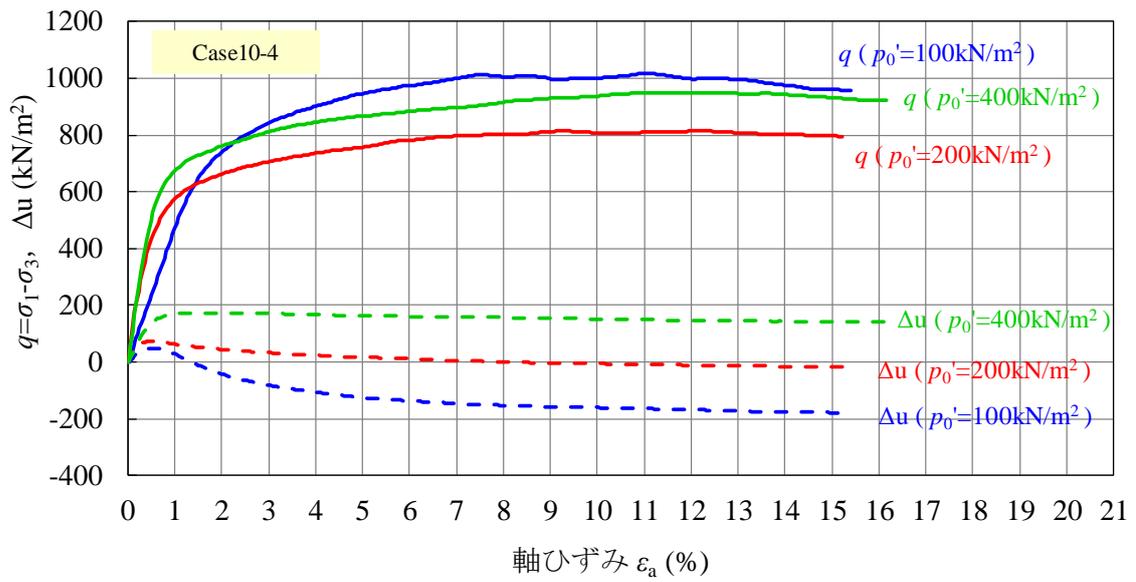


図 5.2-94 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-4)

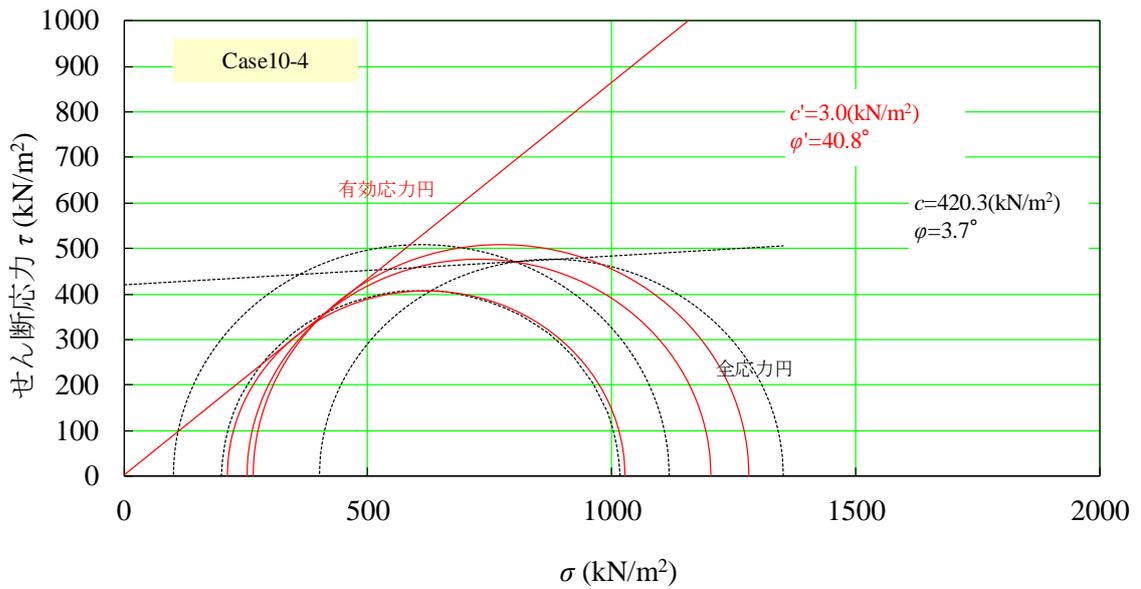


図 5.2-95 モール・クーロンの応力円 (Case10-4)

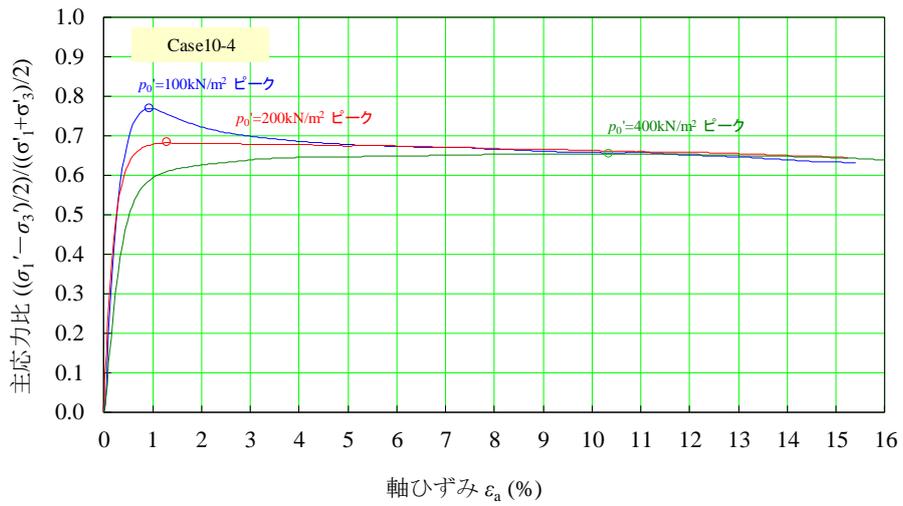


図 5.2-96 主応力比～軸ひずみ関係 (Case10-4)

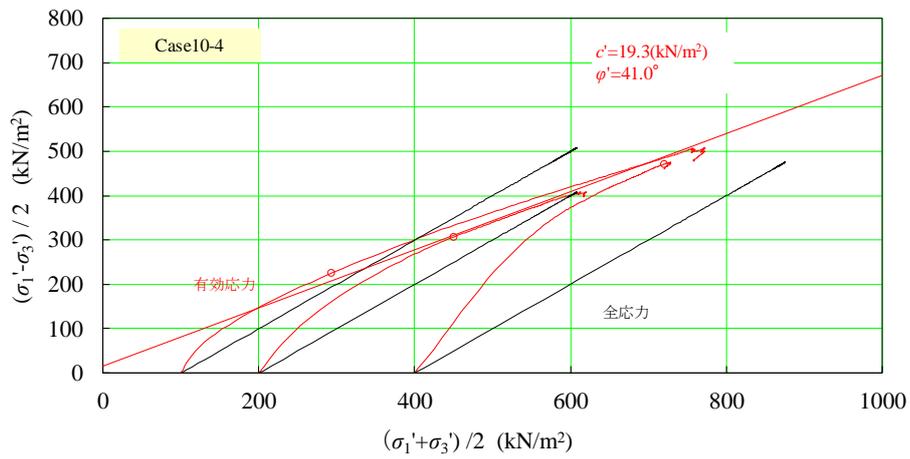


図 5.2-97 主応力経路 (Case10-4)

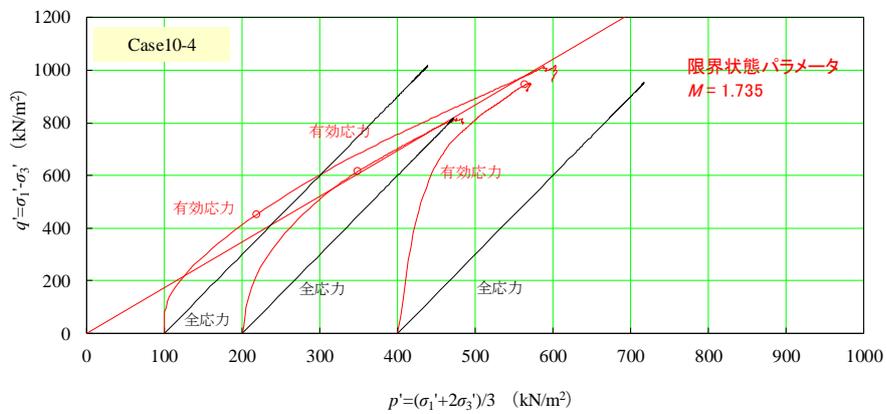


図 5.2-98 軸差応力～平均主応力関係 (Case10-4)

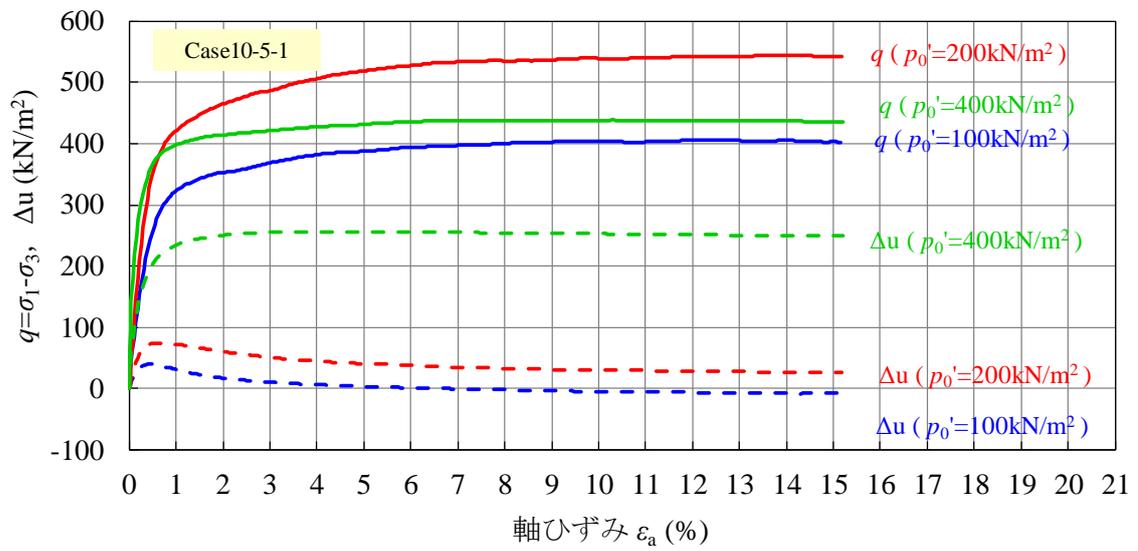


図 5.2-99 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-5-1)

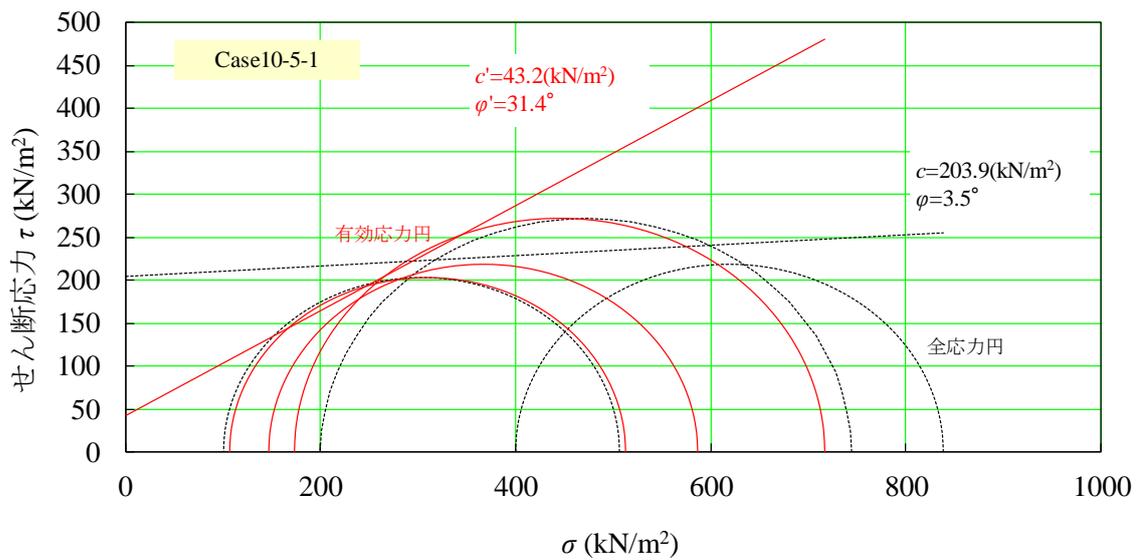


図 5.2-100 モール・クーロンの応力円 (Case10-5-1)

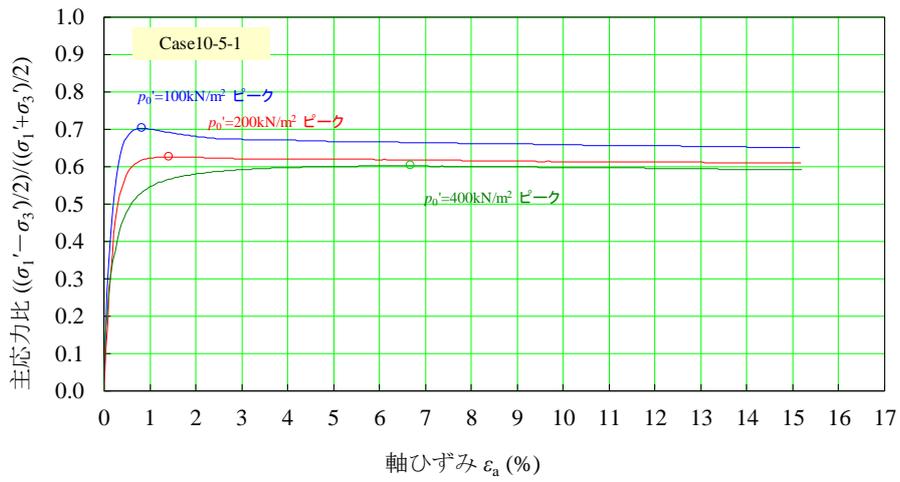


図 5.2-101 主応力比～軸ひずみ関係 (Case10-5-1)

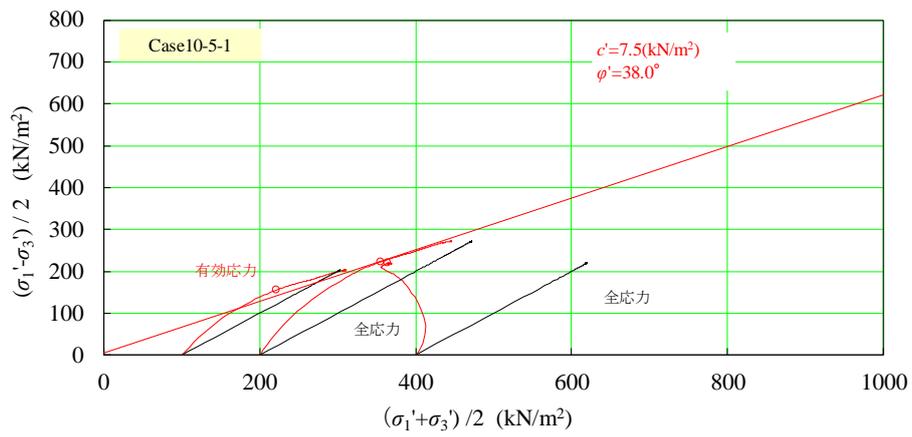


図 5.2-102 主応力経路 (Case10-5-1)

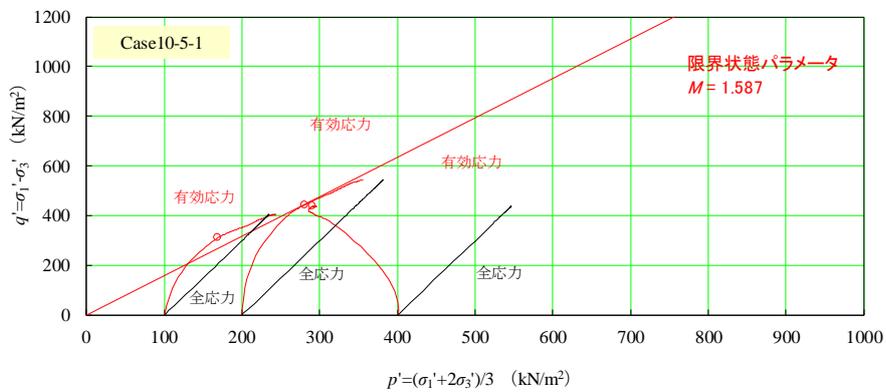


図 5.2-103 軸差応力～平均主応力関係 (Case10-5-1)

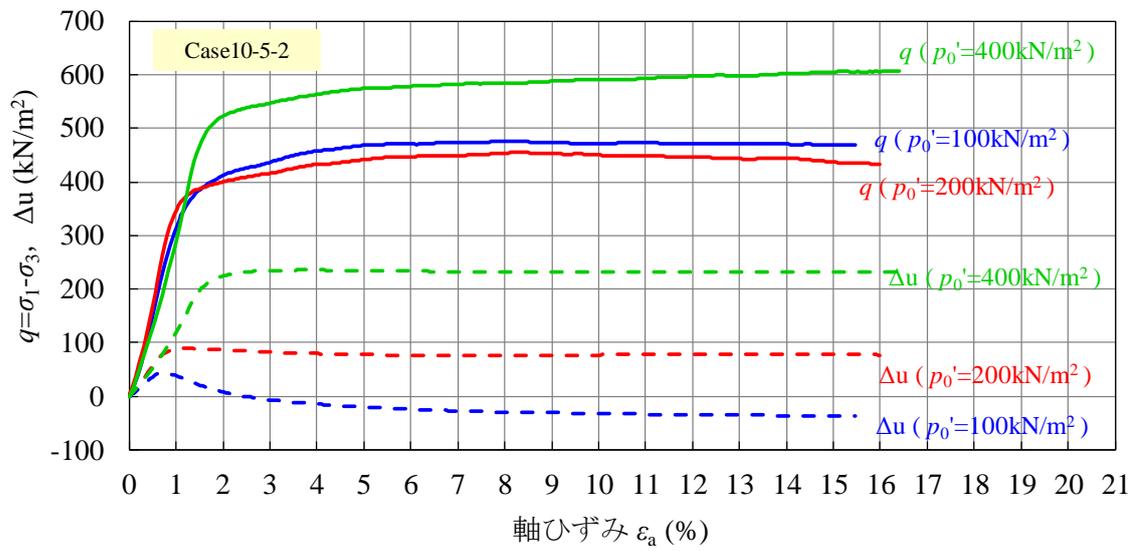


図 5.2-104 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-5-2)

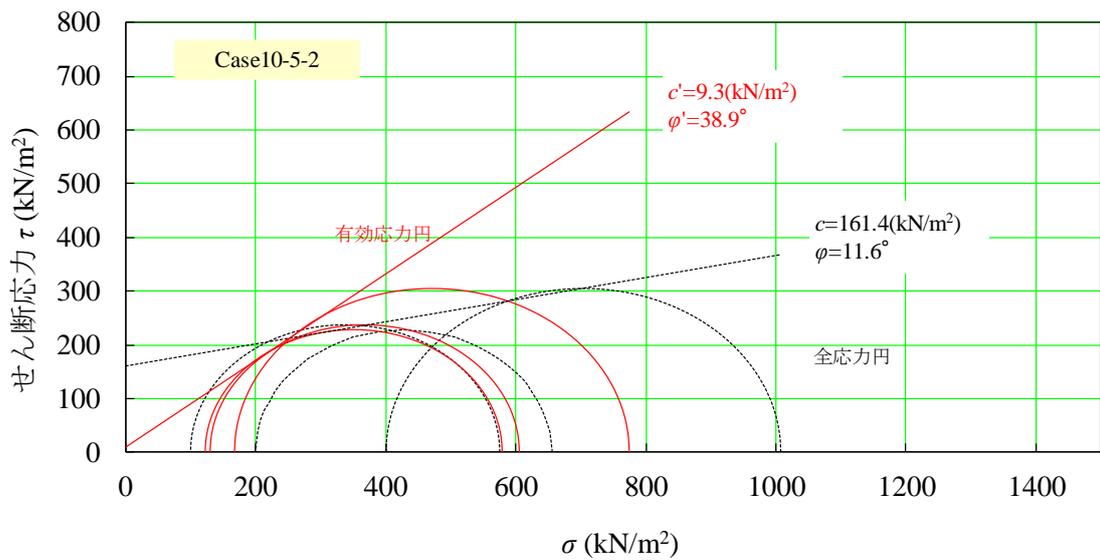


図 5.2-105 モール・クーロンの応力円 (Case10-5-2)

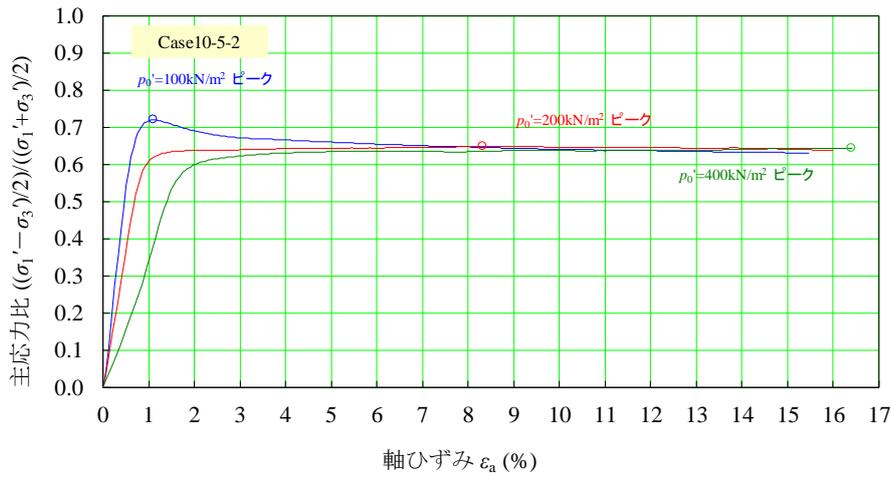


図 5.2-106 主応力比～軸ひずみ関係 (Case10-5-2)

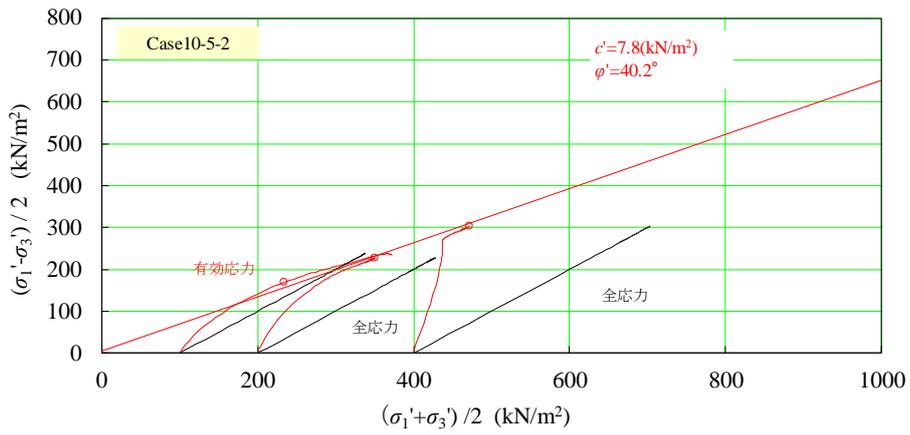


図 5.2-107 主応力経路 (Case10-5-2)

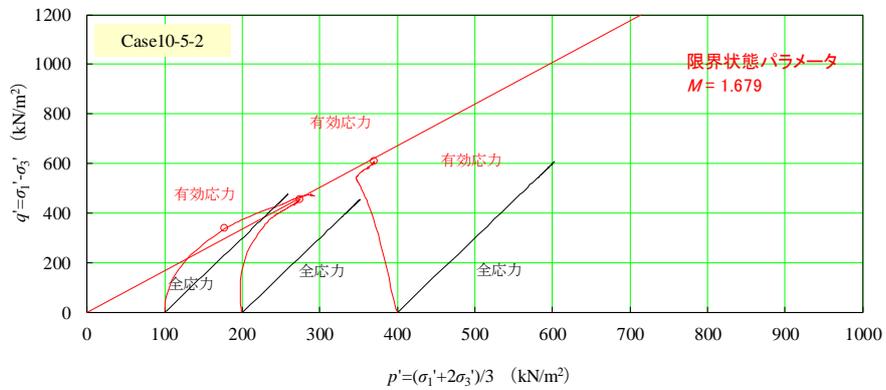


図 5.2-108 軸差応力～平均主応力関係 (Case10-5-2)

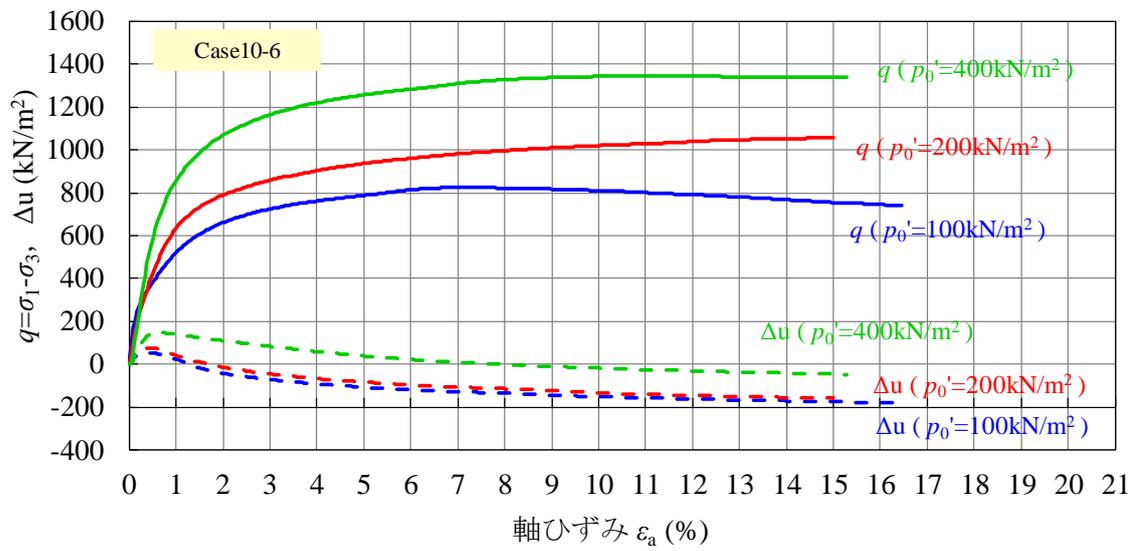


図 5.2-109 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-6)

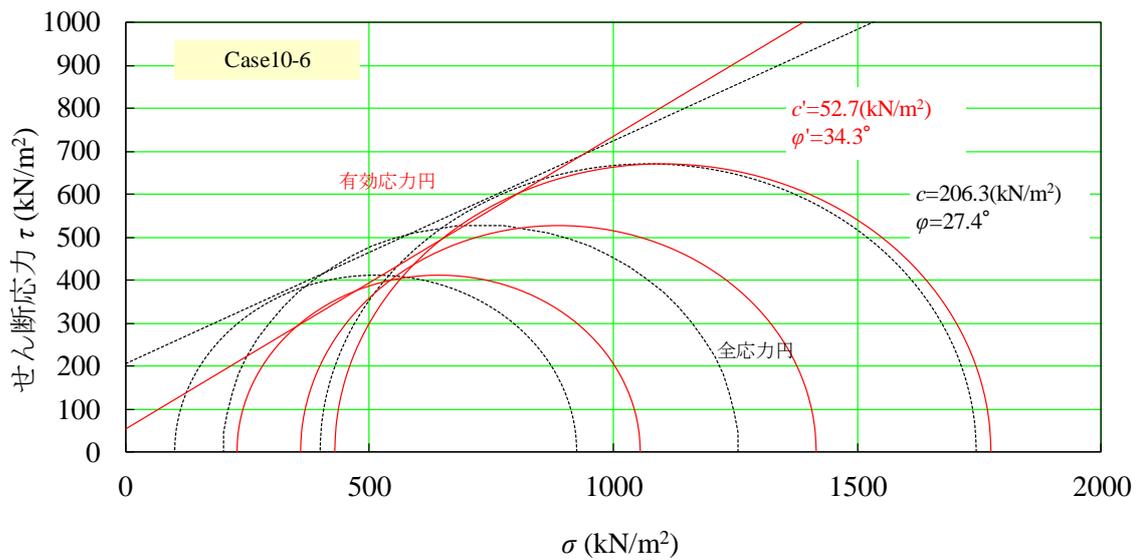


図 5.2-110 モール・クーロンの応力円 (Case10-6)

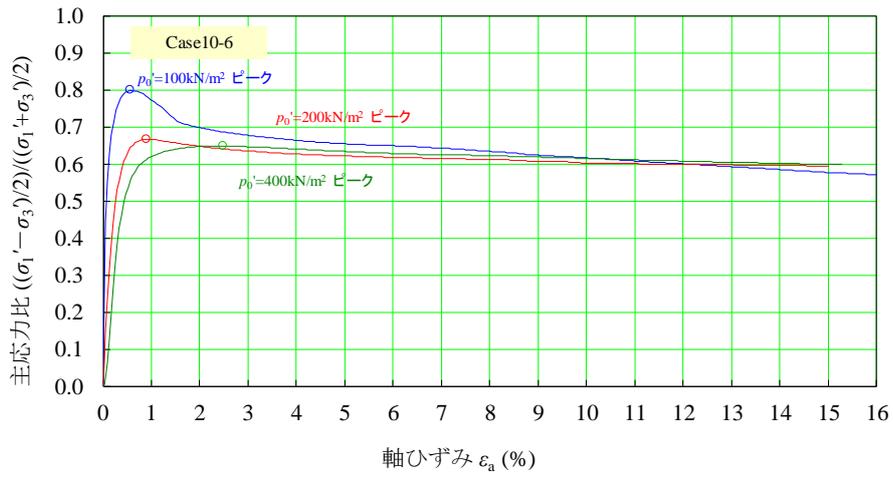


図 5.2-111 主応力比～軸ひずみ関係 (Case10-6)

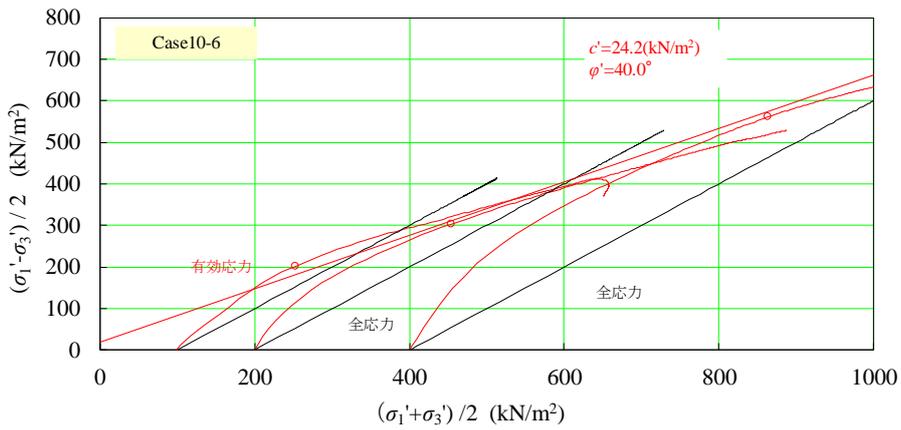


図 5.2-112 主応力経路 (Case10-6)

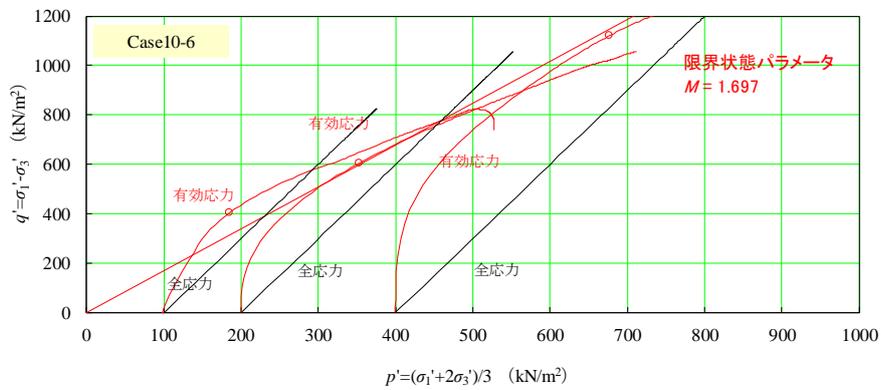


図 5.2-113 軸差応力～平均主応力関係 (Case10-6)

表 5.2-13 下部覆土の三軸圧縮強度試験結果 (Step3)

Case	混合率 (%)				モール応力円		主応力経路		限界状態 パラメータ
	粗粒 砂岩	津軽 2号	玄武岩		c' (MPa)	ϕ (deg)	c' (MPa)	ϕ' (deg)	
			碎石	砕砂					
Case10-4	15	10	45	30	3.0	40.8	19.3	41.0	1.735
Case 10-5-1	30	10	35	25	43.2	31.4	7.5	38.0	1.587
Case 10-5-2	30	10	35	25	9.3	38.9	7.8	40.2	1.679
Case10-6	55	10	20	15	52.7	34.3	24.2	40.0	1.697

③ 繰り返し三軸試験 (動的変形試験)

表 5.2-14 に下部覆土の繰り返し三軸試験 (動的変形試験) の試験ケースを示す。各ケースの剛性の履歴減衰 (H-D モデル) を図 5.2-114~図 5.2-119 に示す。せん断ひずみの増加に伴い剛性の低下がみられる。各ケースとも、ひずみが 0.001%程度まで剛性が大きく低下することはなかったが、ひずみが小さいレベルから徐々に剛性が低下していくのを確認した。履歴減衰係数は Case10-4 が最も高く 19.29%、Case10-5 が 18.20%、Case10-6 が 16.72%、Case05-6 が 14.40%、Case05-5 が 14.36%、Case05-4 が 13.24% であった。

表 5.2-14 下部覆土の繰り返し三軸試験 (動的変形試験) ケース (Step2)

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)	備考
	粗粒 砂岩	津軽 2号	玄武岩				
			碎石	砕砂			
Case05-4	20	5	45	30	95	100	
Case05-5	35	5	35	25	95	100	
Case05-6	60	5	20	15	95	100	
Case10-4	15	10	45	30	95	100	
Case10-5	30	10	35	25	95	100	
Case10-6	55	10	20	15	95	100	

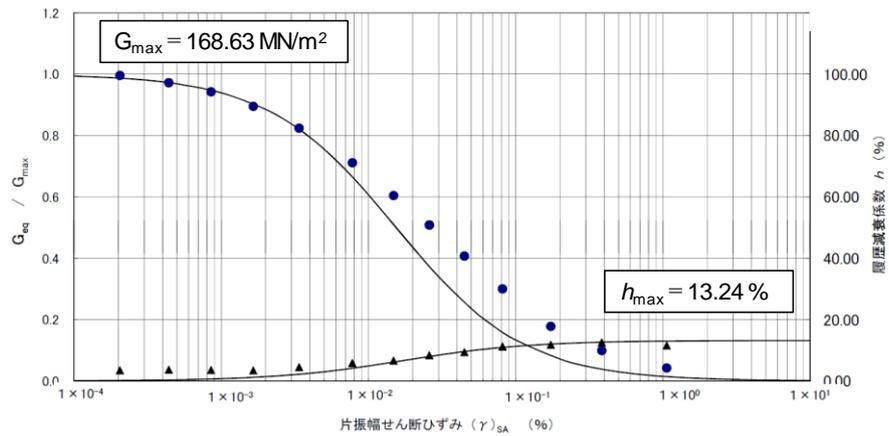


図 5.2-114 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case05-4)

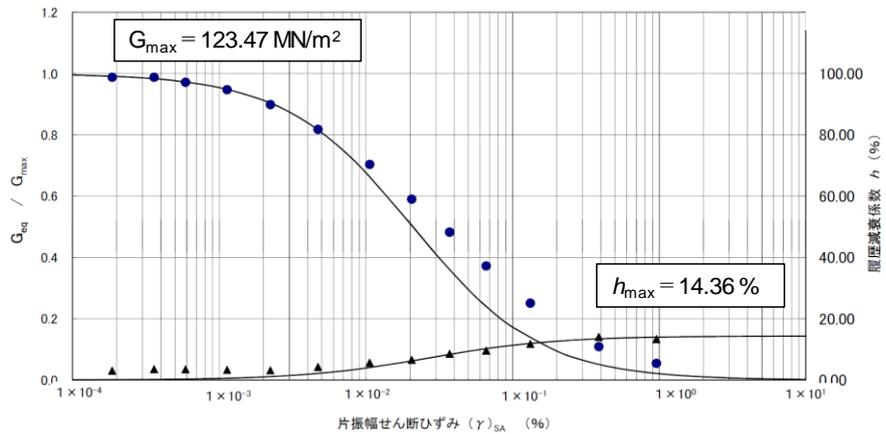


図 5.2-115 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case05-5)

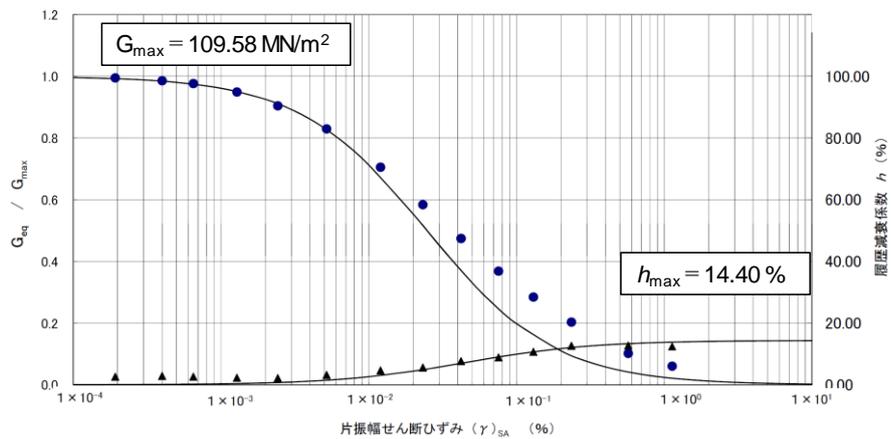


図 5.2-116 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case05-6)

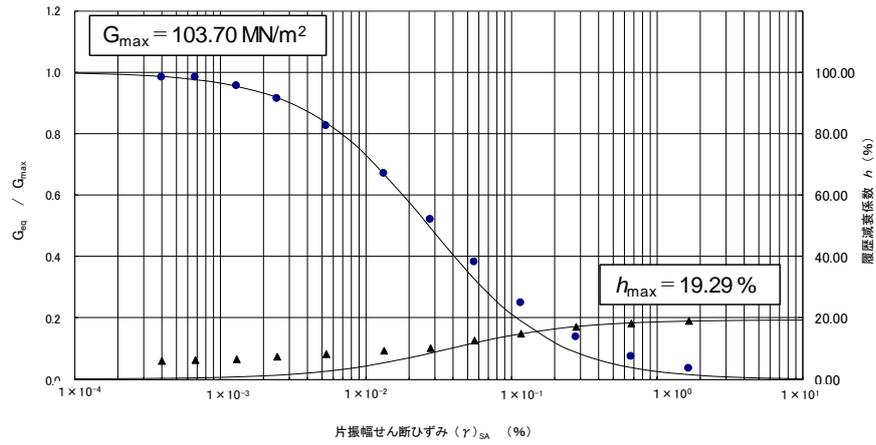


図 5.2-117 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case10-4)

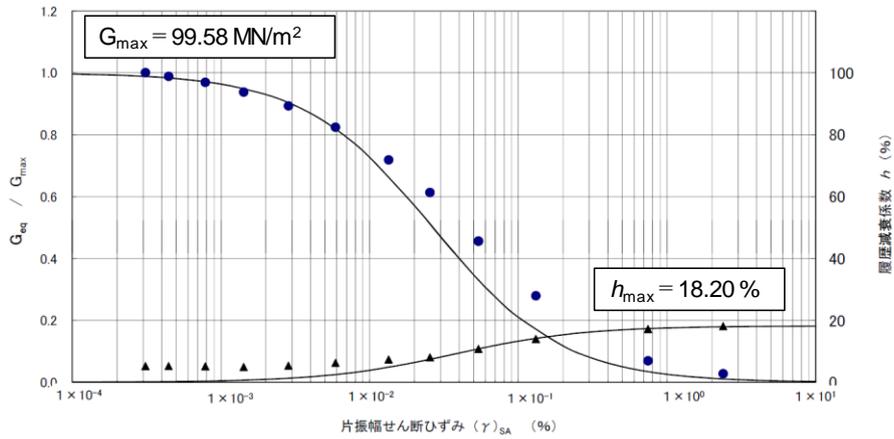


図 5.2-118 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case10-5)

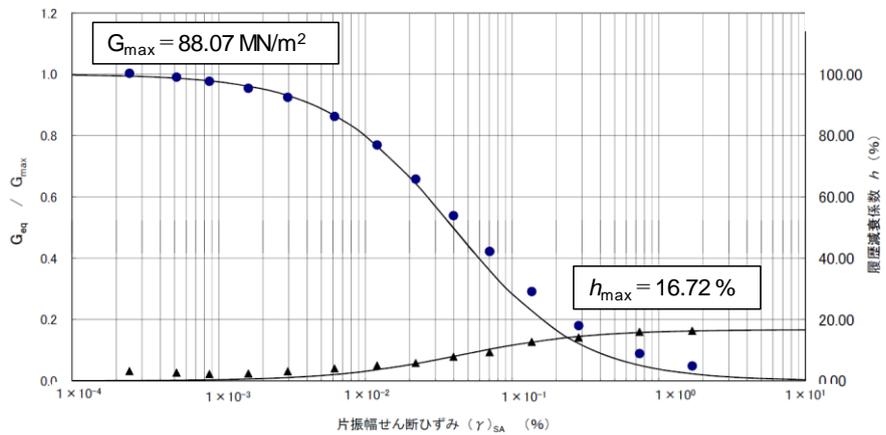


図 5.2-119 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case10-6)

④ 繰り返し三軸試験（液状化試験）

表 5.2-15 に下部覆土の繰り返し三軸試験（液状化強度試験）（Step2）の試験ケースを示す。また、図 5.2-120、図 5.2-121 に各ケースの液状化強度試験の結果を示す。繰り返し回数 20 回の時の応力増幅比 σ_d / σ'_0 は、Case05-4 で 0.576、Case05-6 で 0.678、Case10-4 で 0.600、Case10-5 で 0.525、Case10-6 で 0.678 であった。

表 5.2-15 下部覆土の繰り返し三軸試験（液状化強度試験）ケース（Step2）

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)	R_{L20}
	粗粒砂岩	津軽 2号	玄武岩				
			碎石	砕砂			
Case05-4	20	5	45	30	95	100	0.576
Case05-6	60	5	20	15	95	100	0.678
Case10-4	15	10	45	30	95	100	0.600
Case10-5	30	10	35	25	95	100	0.525
Case10-6	55	10	20	15	95	100	0.678

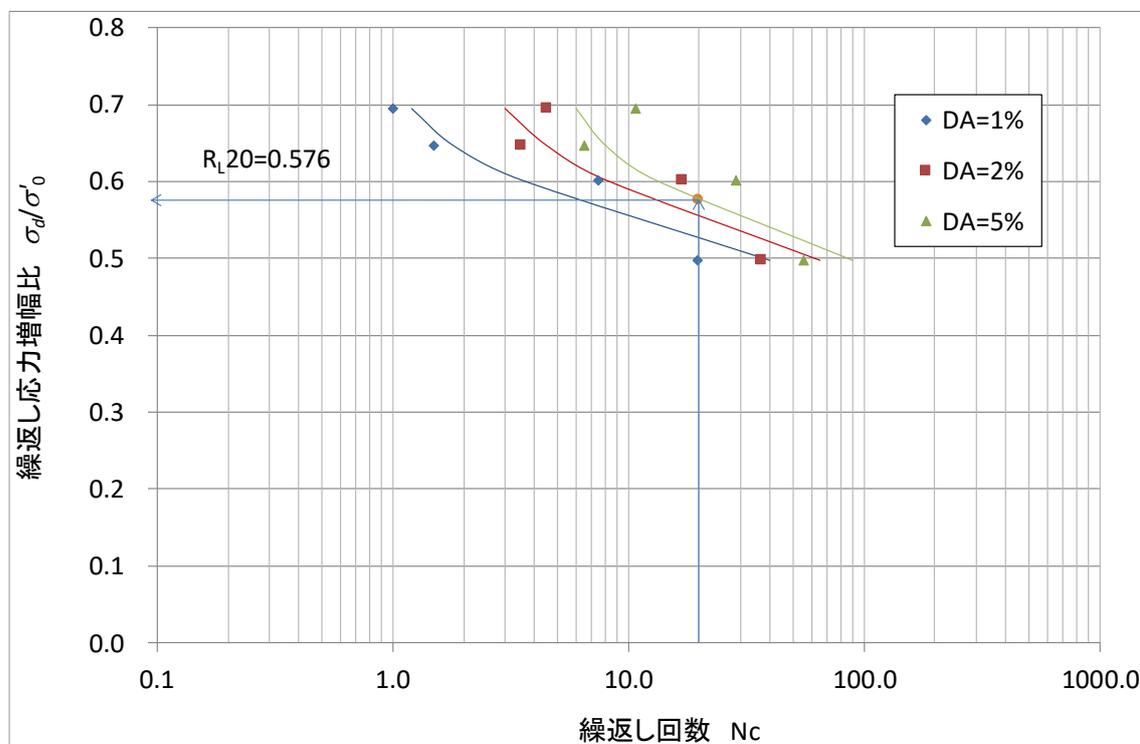


図 5.2-120 液状化強度（Case05-4）

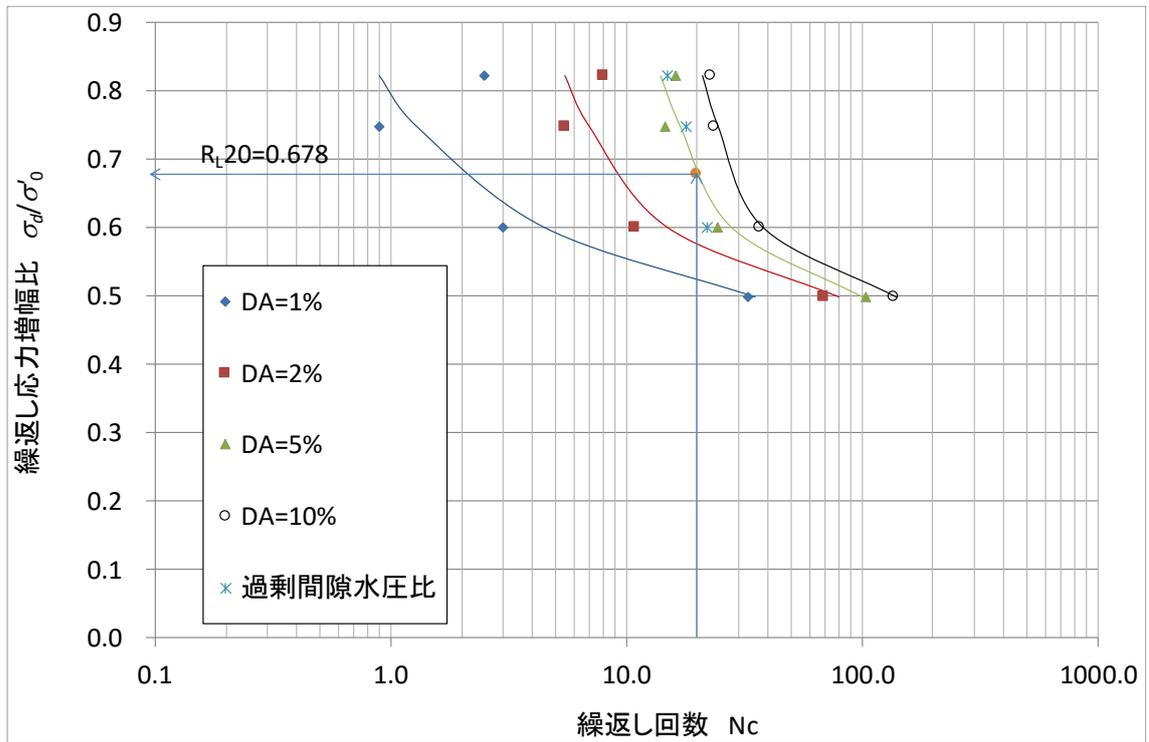


図 5.2-121 液状化強度 (Case05-6)

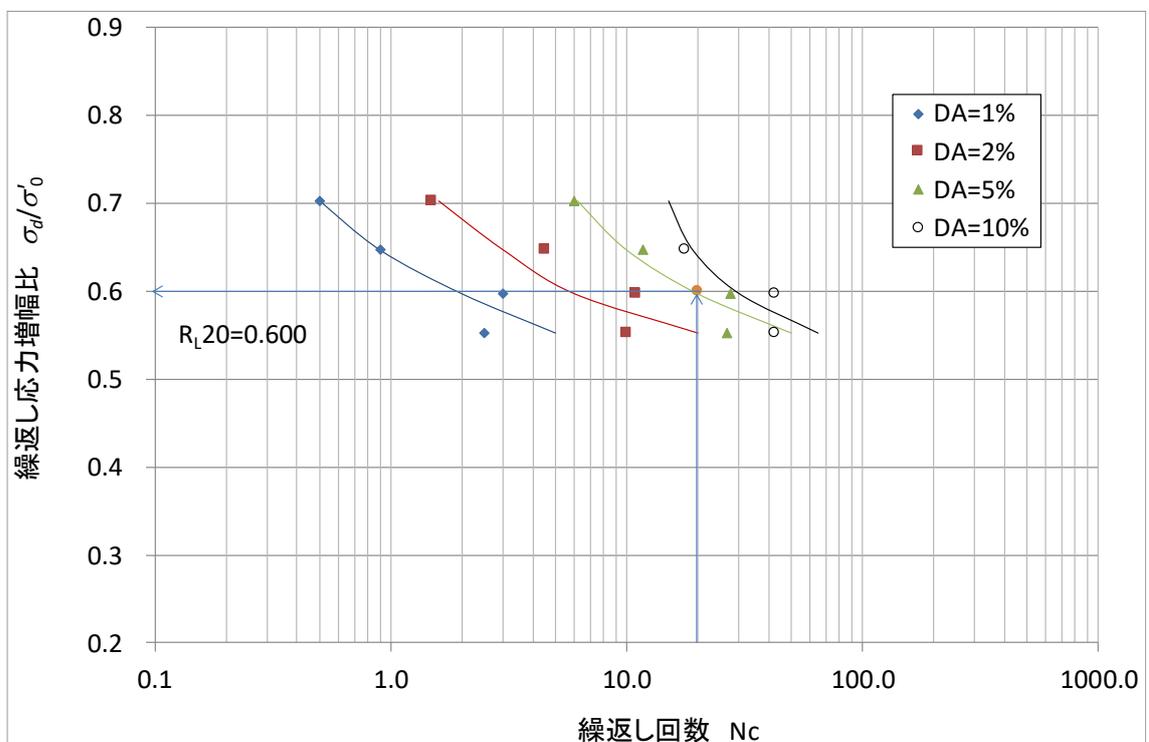


図 5.2-122 液状化強度 (Case10-4)

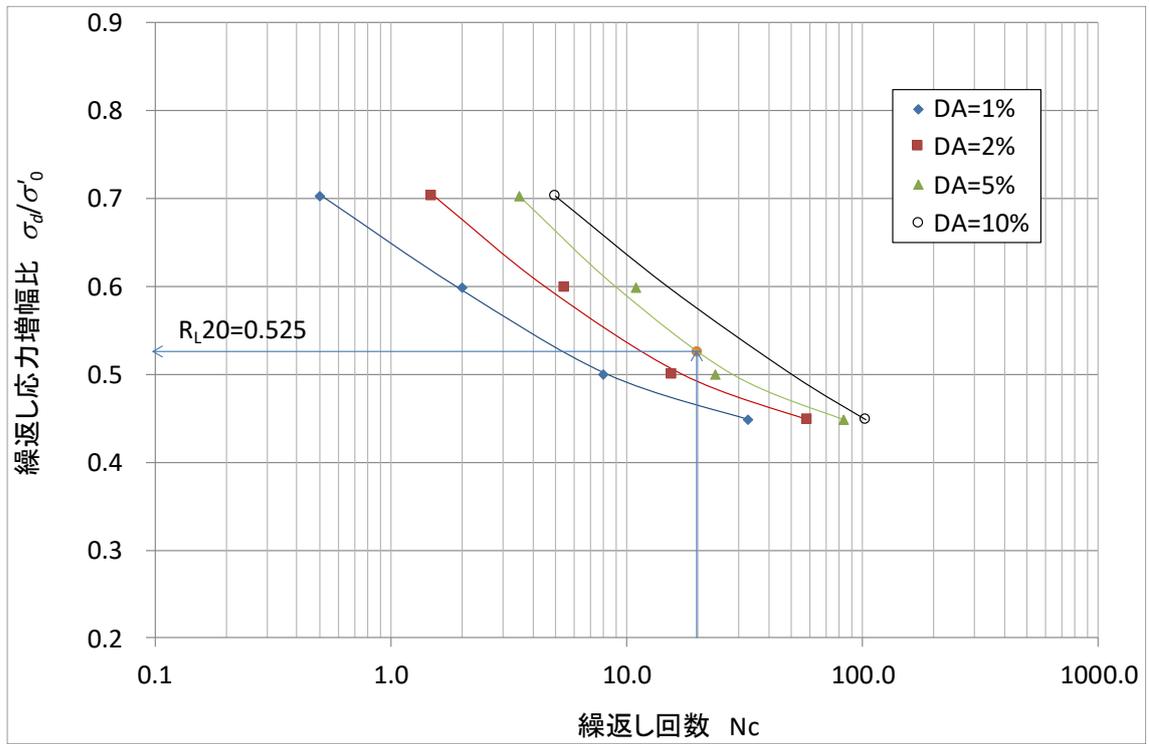


図 5.2-123 液状化強度 (Case10-5)

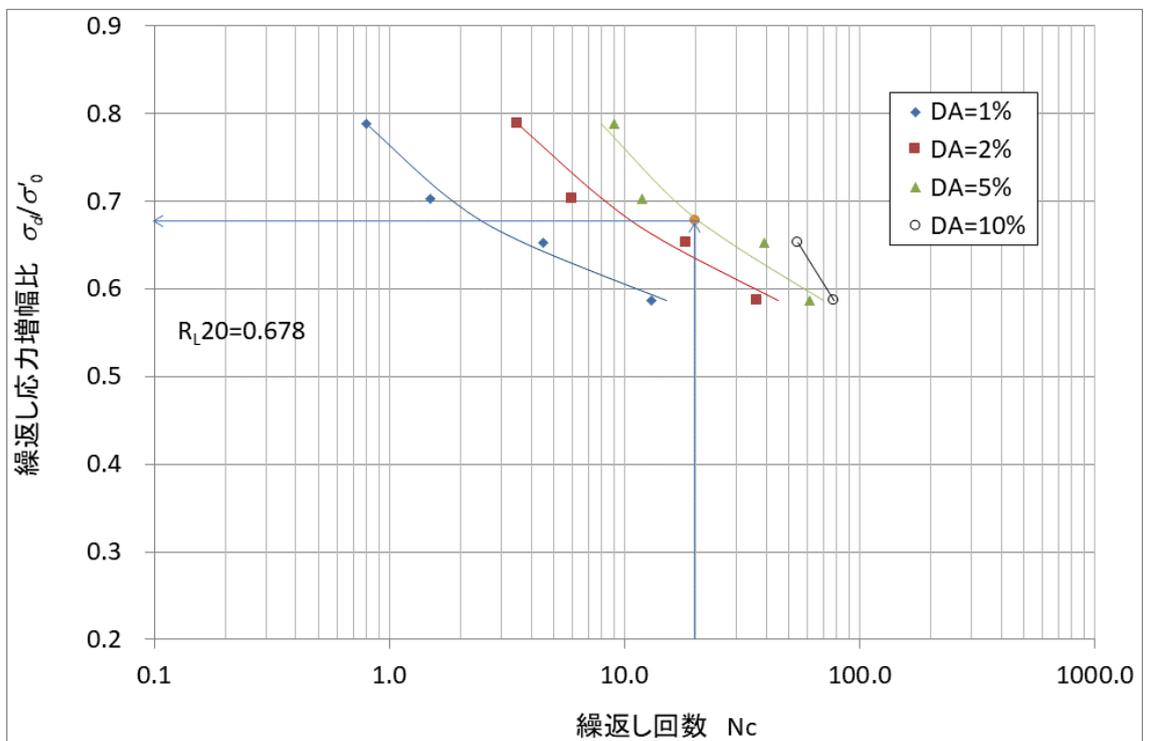


図 5.2-124 液状化強度 (Case10-6)

⑤ 弾性波速度試験

表 5.2-16 に下部覆土の弾性波速度測定ケースの試験ケースを示す。Case05-4～Case05-6 および Case10-4～Case10-6 は飽和後の供試体が自立困難であったため、100kPa で拘束した状態で測定を行った。図 5.2-125～図 5.2-130 に各ケースの弾性波速度測定時の弾性波波形の経時変化を示す。図 5.2-36～図 5.2-38 に示した難透水性覆土の場合と異なり、波形が変化する点の時間の読み取りは容易であった。

測定した結果を表 5.2-17 に示す。 V_p の平均値は Case05-4 が 1982.0m/s、Case05-5 が 1977.0m/s、Case05-6 が 2133.0m/s、Case10-4 が 1566.0m/s、Case10-5 が 1978.0m/s、Case10-6 が 1971.0m/s となった。 V_s の平均値は Case05-4 が 411.0m/s、Case05-5 が 322.0m/s、Case05-6 が 308.0m/s となった。Case05-4～Case05-6 においては、礫分が多く混合されているケースの方が V_p は小さくなり、 V_s は大きくなった。Case10-4～Case10-6 においては有意な差は見られなかった。

表 5.2-16 下部覆土の弾性波速度測定ケース (Step2)

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)	備考
	粗粒砂岩	津軽 2号	玄武岩				
			碎石	砕砂			
Case05-4	20	5	45	30	95	100	
Case05-5	35	5	35	25	95	100	
Case05-6	60	5	20	15	95	100	
Case10-4	15	10	45	30	95	100	
Case10-5	30	10	35	25	95	100	
Case10-6	55	10	20	15	95	100	

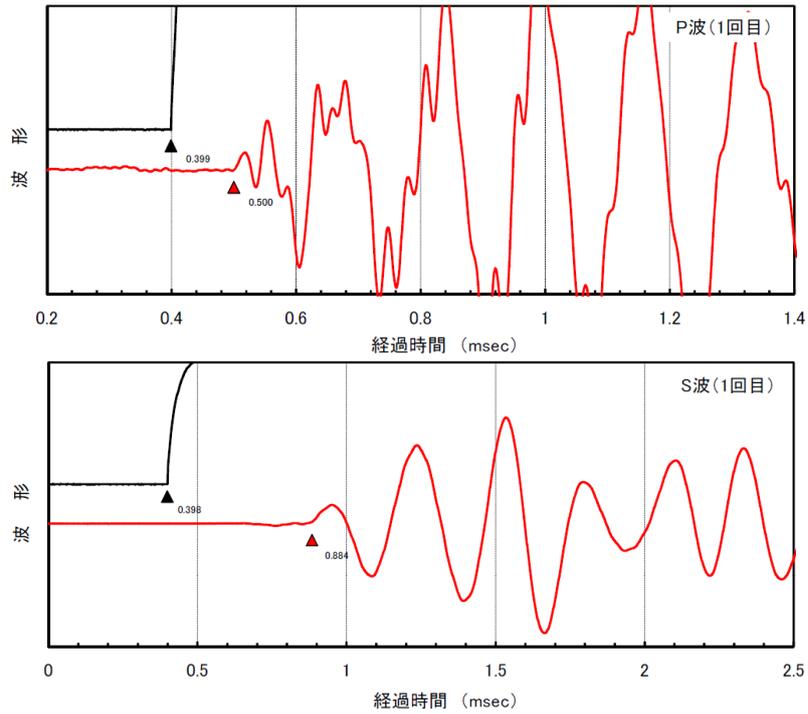


図 5.2-125 弾性波の強度と透過時間関係 (Case05-4、上：P波、下：S波)

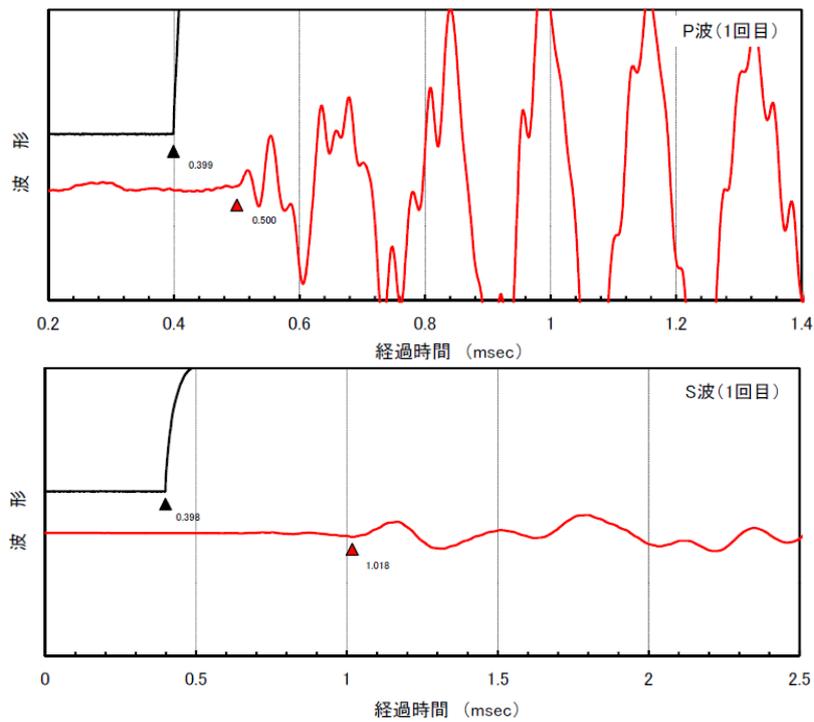


図 5.2-126 弾性波の強度と透過時間関係 (Case05-5、上：P波、下：S波)

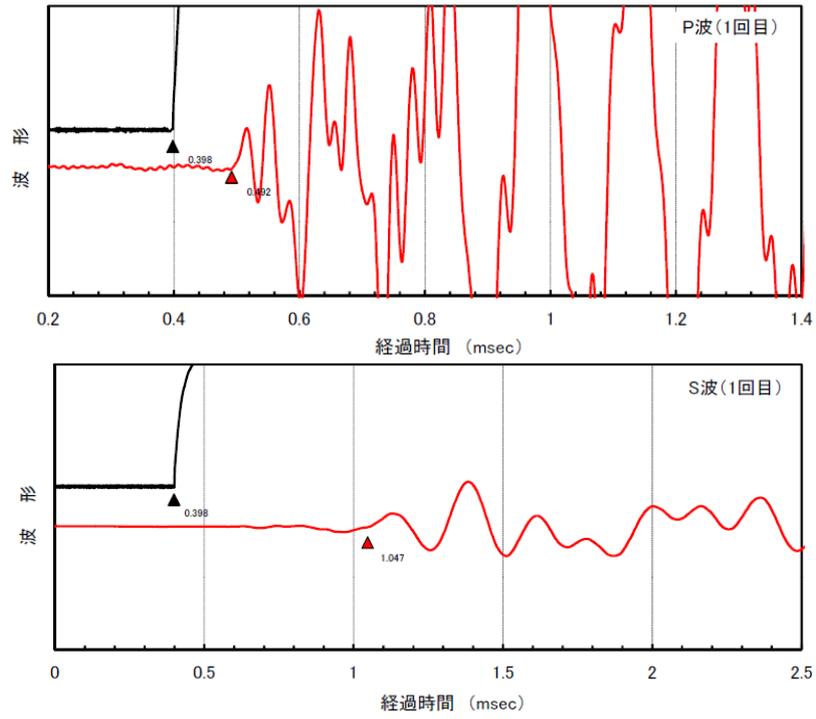


図 5.2-127 弾性波の強度と透過時間関係 (Case05-6、上：P波、下：S波)

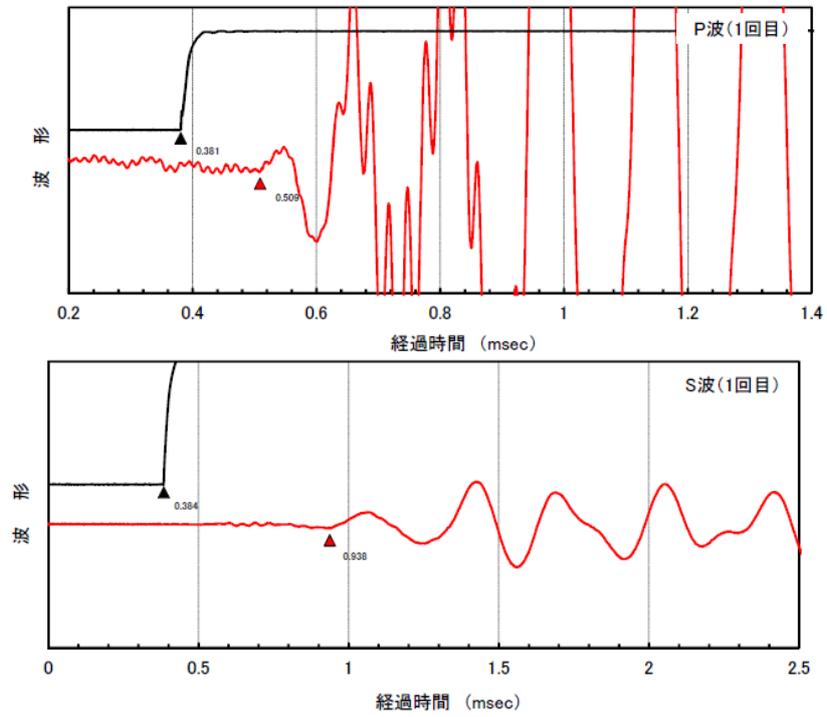


図 5.2-128 弾性波の強度と透過時間関係 (Case10-4、上：P波、下：S波)

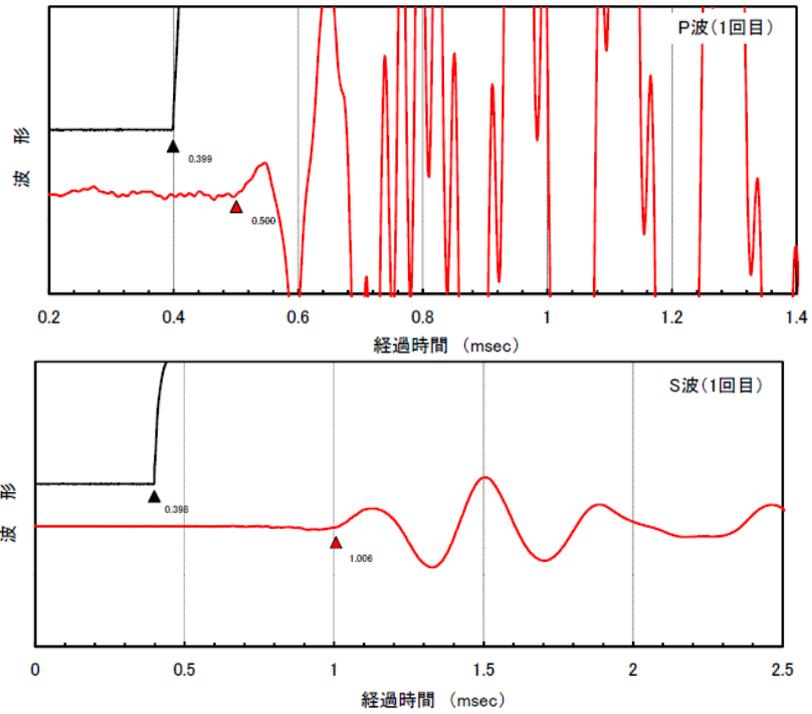


図 5.2-129 弾性波の強度と透過時間関係 (Case10-5、上：P波、下：S波)

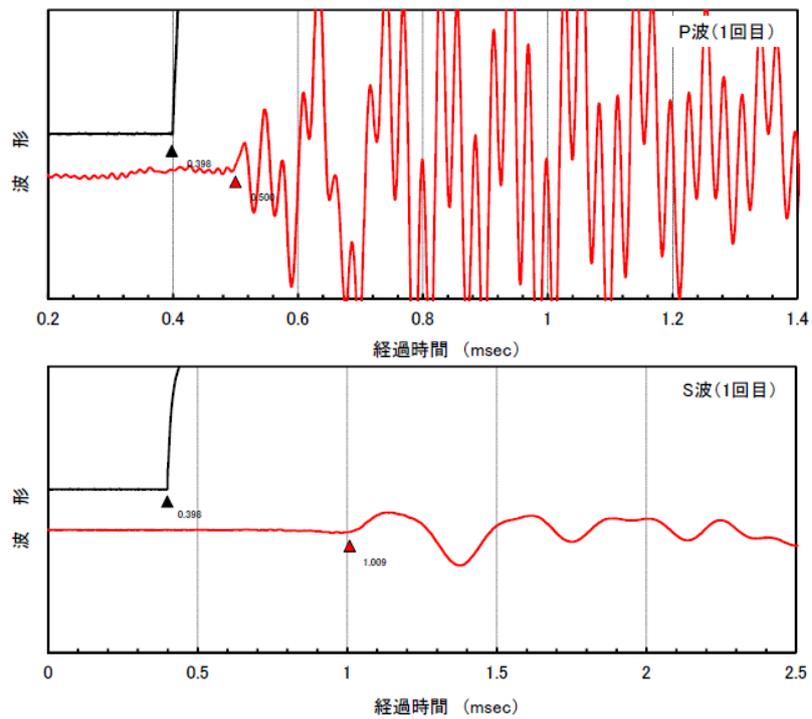


図 5.2-130 弾性波の強度と透過時間関係 (Case10-6、上：P波、下：S波)

表 5.2-17 下部覆土材料の弾性波速度測定結果

		Case 05-4	Case 05-5	Case 05-6	Case 10-4	Case 10-5	Case 10-6
Vp (m/s)	1 回目	1982.0	1977.0	2133.0	1566.0	1978.0	1971.0
	2 回目	1982.0	1977.0	2133.0	1566.0	1978.0	1971.0
	平均	1982.0	1977.0	2133.0	1566.0	1978.0	1971.0
Vs (m/s)	1 回目	411.0	322.0	308.0	362.0	330.0	328.0
	2 回目	411.0	322.0	308.0	362.0	330.0	328.0
	平均	411.0	322.0	308.0	362.0	330.0	328.0
動ポアソン比		0.478	0.486	0.489	0.472	0.486	0.486
動弾性係数 (MN/m ²)		1142.6	690.4	607.2	879.7	726.4	686.2
動せん断弾性係数 (MN/m ²)		386.7	232.3	203.8	298.8	244.5	230.9

(5) 化学劣化抵抗性の向上を図るために石粉を用いた検討

ベントナイトの代わりに石粉を混合するケースについて検討した。検討するケースは、Step3 の Case10-4 (Fuller 指数 n=0.4)、Case10-6 (Fuller 指数 n=0.2) とした。試験ケースを表 5.2-18 に示す。石粉として碎石、砕砂として使用している玄武岩の石粉を特別に製作し使用することとした。図 5.2-131 に Step4 で使用した材料の粒度を示す。玄武岩の石粉はベントナイトに比べて粗いが細粒分含有率は 70%程度もあり、粗粒砂岩に比べれば非常に細かい。図 5.2-132 には、Step4 における混合土の粒度を示す。ベントナイトを混合した場合に比べて、細粒分含有率が若干、小さくなっている。

表 5.2-18 下部覆土の検討ケース一覧 (Step4)

Case	混合率 (%)				備考
	粗粒砂岩	玄武岩 石粉	玄武岩		
			碎石	砕砂	
Case10-4a	15	10	45	30	n=0.4
Case10-6a	55	10	20	15	n=0.2

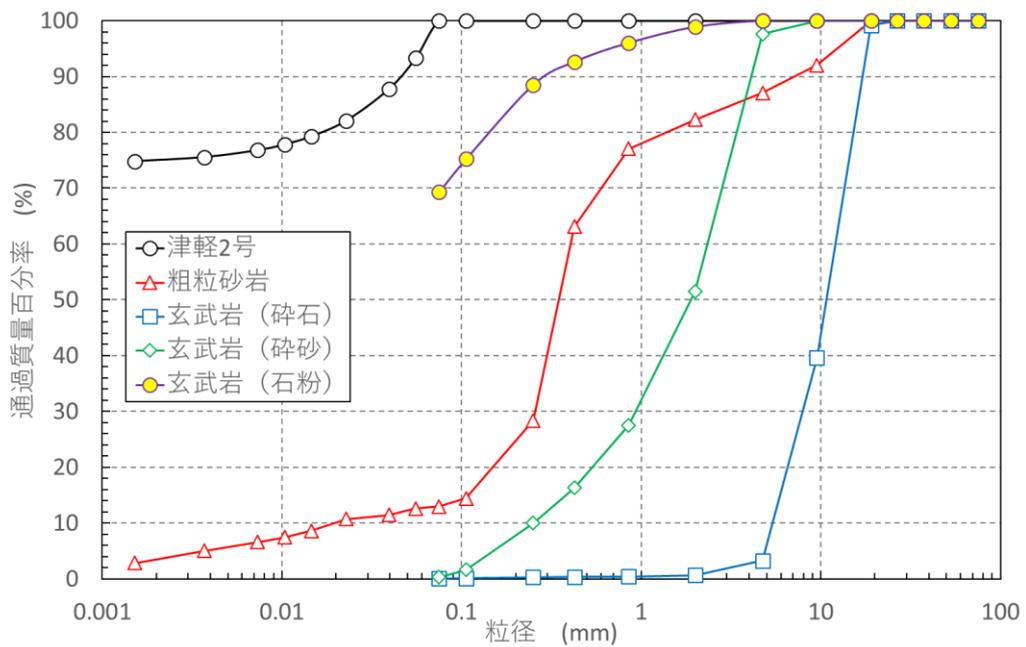


図 5.2-131 Step4 で用いた材料の粒度

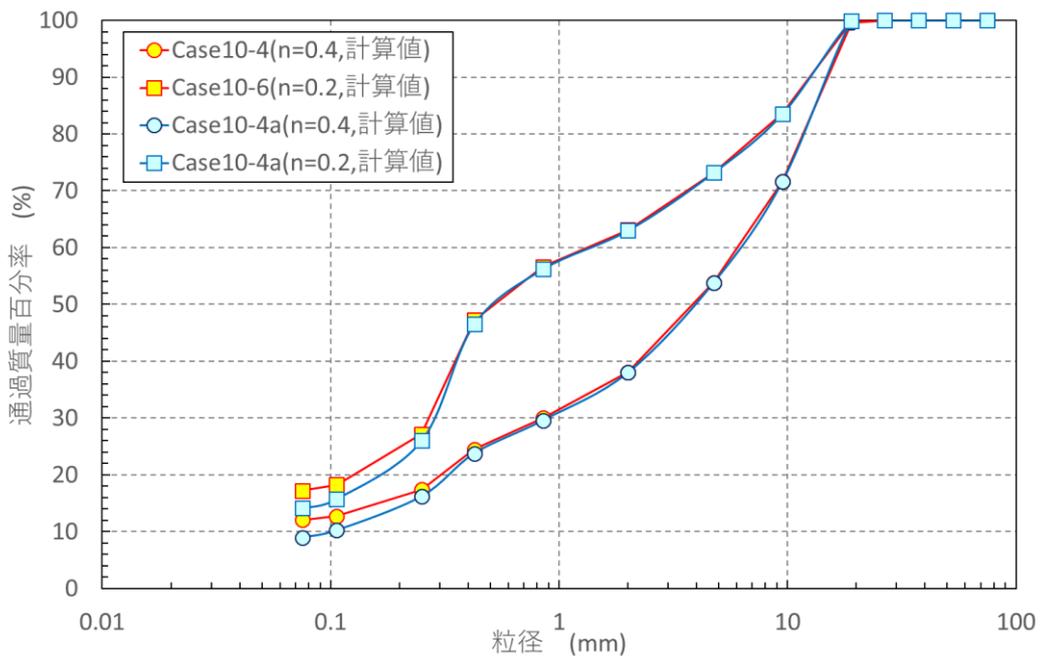


図 5.2-132 Step4 における各混合土の粒度 (Case10-4a、Case10-6a)

図 5.2-133 および図 5.2-134 には、各ケースの締固め曲線を示す。また、締固め試験結果の一覧を表 5.2-19 に示す。表 5.2-19 には、Step2 および Step3 の結果も合わせて示している。図 5.2-135 には、ベントナイトを混合した場合のケースとの比較を示す。ベント

ナイトを混合した場合より、玄武岩石粉を混合した場合の方が得られる最大乾燥密度が大きくなっている。

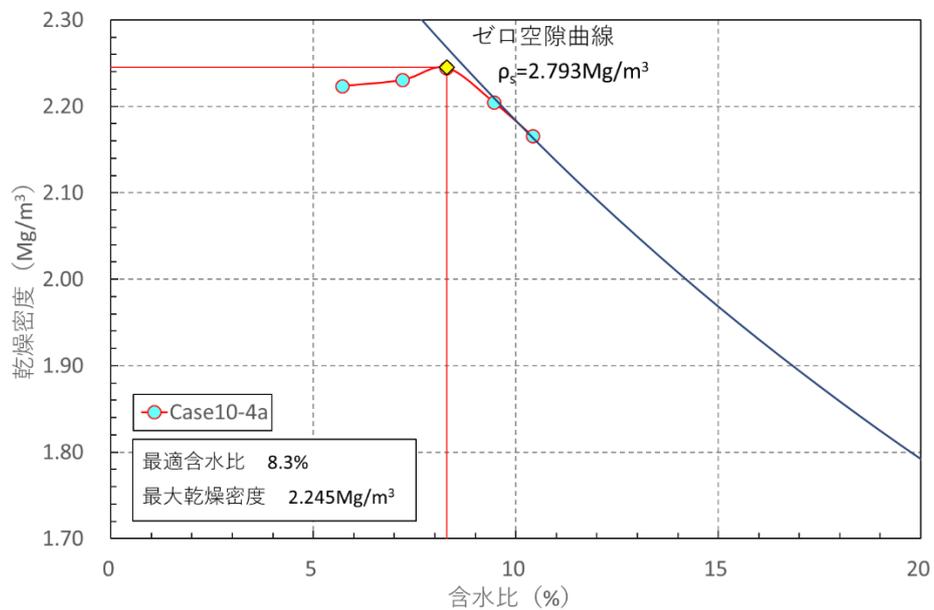


図 5.2-133 締固め試験結果

(Case10-4a；粗粒砂岩 15%、碎石 45%、碎砂 30%、石粉 10%)

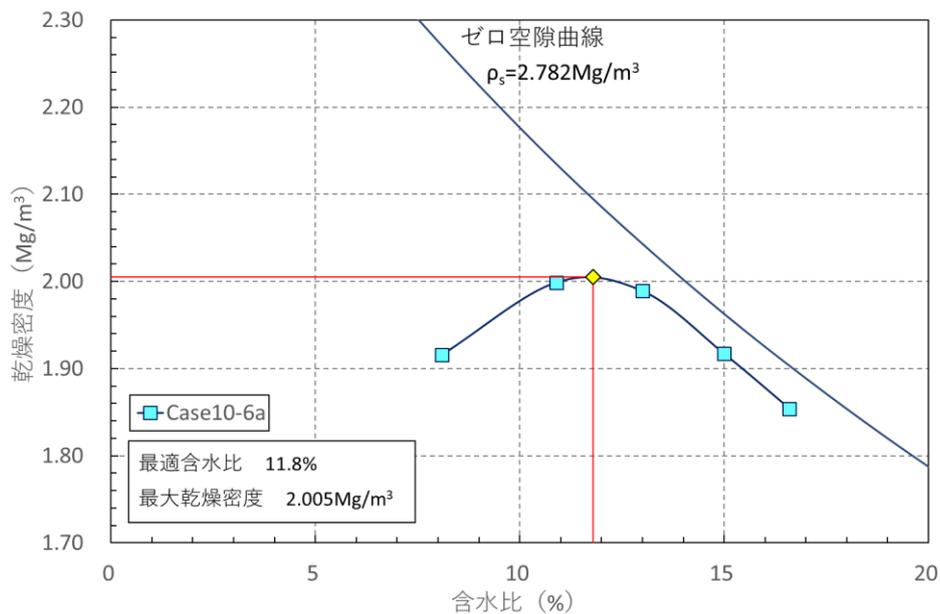


図 5.2-134 締固め試験結果

(Case10-6a；粗粒砂岩 55%、碎石 20%、碎砂 15%、石粉 10%)

表 5.2-19 下部覆土の締固め試験結果 (Step4)

Case	母岩		ベントナイト		購入石			土粒子 密度 (Mg/m ³)	締固め試験結果				
	種類	混合率	種類	混合率	種類	碎石	砕砂		最適 含水比 (%)	最大 乾燥密度 (Mg/m ³)	間隙比 (-)	間隙率 (%)	飽和度 (%)
						混合率	混合率						
Case10-4a	粗粒砂岩	15	玄武岩石粉	10	玄武岩	45	30	2.793	8.3	2.245	0.244	19.6	95.0
Case10-6a	粗粒砂岩	55	玄武岩石粉	10	玄武岩	20	15	2.782	11.8	2.005	0.388	27.9	84.7

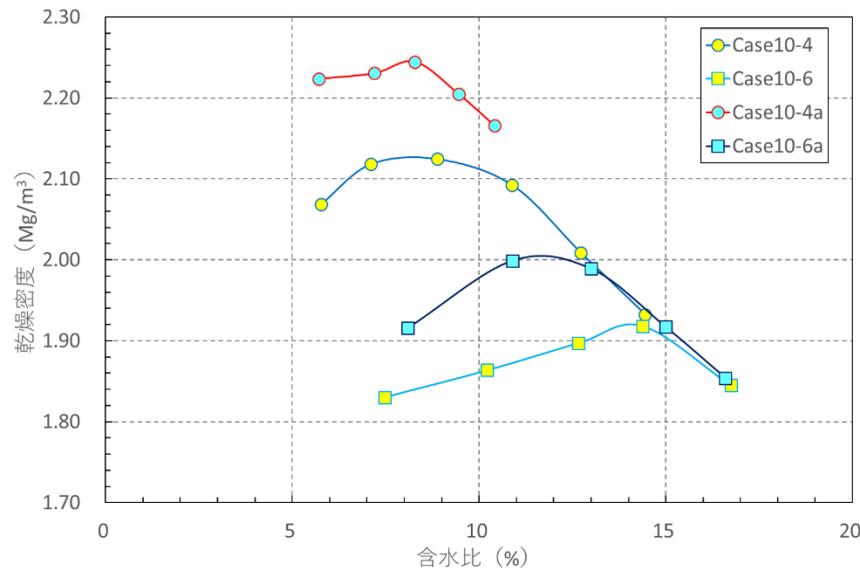


図 5.2-135 締固め曲線の比較 (ベントナイト添加と石粉添加の比較)

① 透水試験

Step4 における透水試験のケースを表 5.2-20 に示す。供試体の初期含水比は締固め試験における最適含水比とし、乾燥密度は最大乾燥密度の 95% (C 値=95%) とした。

透水試験の結果を図 5.2-136 に示す。透水係数と乾燥密度の関係である。同図には 2015 年度の検討で実施した粗粒砂岩 50%、ベントナイト (クニゲル U) 10%、碎石 (石灰岩碎石 2005) 40% を混合した材料での透水試験結果、また、Step1、Step2、Step3 の結果も合わせて示している。石粉を用いた場合でもベントナイトを用いた場合と同程度の透水係数が得られている。

表 5.2-20 下部覆土の透水試験ケース (Step4)

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	乾燥密度 (Mg/m ³)	初期含水比 (%)
	粗粒砂岩	玄武岩石粉	玄武岩				
			碎石	碎砂			
Case 10-4a-1	15	10	45	30	95	2.133	8.3
Case 10-6a-1	55	10	20	15	95	2.005	11.8

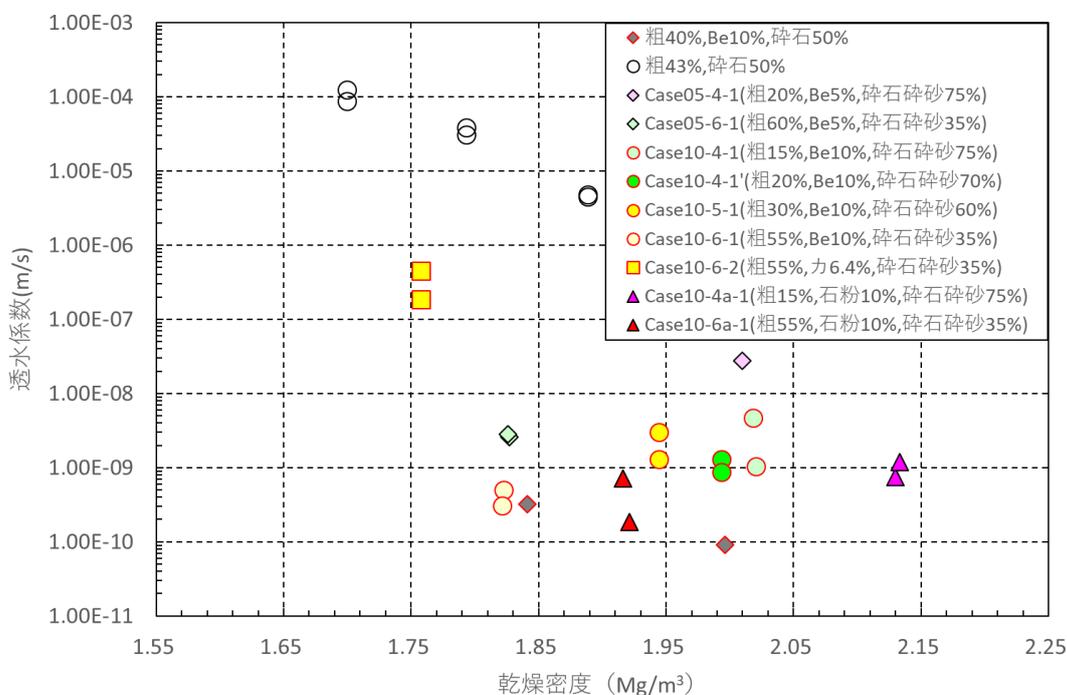


図 5.2-136 下部覆土 Step 4 の透水試験結果 (透水係数と乾燥密度の関係)

② 三軸圧縮強度試験

表 5.2-21 に示すように Step4 の下部覆土の三軸圧縮強度試験は Case10-6a のみ実施した。試験結果を図 5.2-137～図 5.2-141 に示す。

図 5.2-138 に示したモール・クーロンの応力円、図 5.2-140 に示した主応力経路、図 5.2-141 に示した軸差応力～平均主応力関係より有効応力を元にした粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' 、限界状態パラメータ M を求めた。その結果を表 5.2-22 に示す。比較のために Case10-6 の結果も併記した。内部摩擦角 ϕ' はモール・クーロンの応力円で求めたものよりも主応力経路から求めたものの方が高めになった。粘着力 c' はベントナイトを混合した Case10-6 の方が大きく、内部摩擦角 ϕ' はベントナイトを混合した Case10-6 の方が小さくなった。限界状態パラメータ M に関しても Case10-6 の方が小さくなった。

表 5.2-21 下部覆土の三軸圧縮強度試験ケース (Step4)

Case	混合率 (%)				C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)		
	粗粒 砂岩	玄武岩 石粉	玄武岩					
			碎石	砕砂				
Case10-6a	55	10	20	15	95	100	200	400

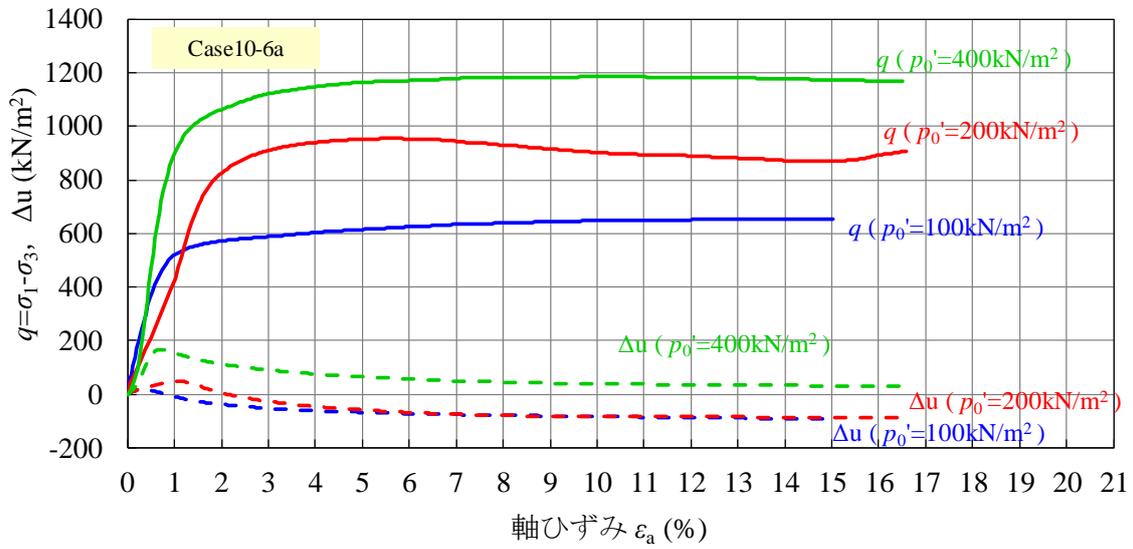


図 5.2-137 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case10-6a)

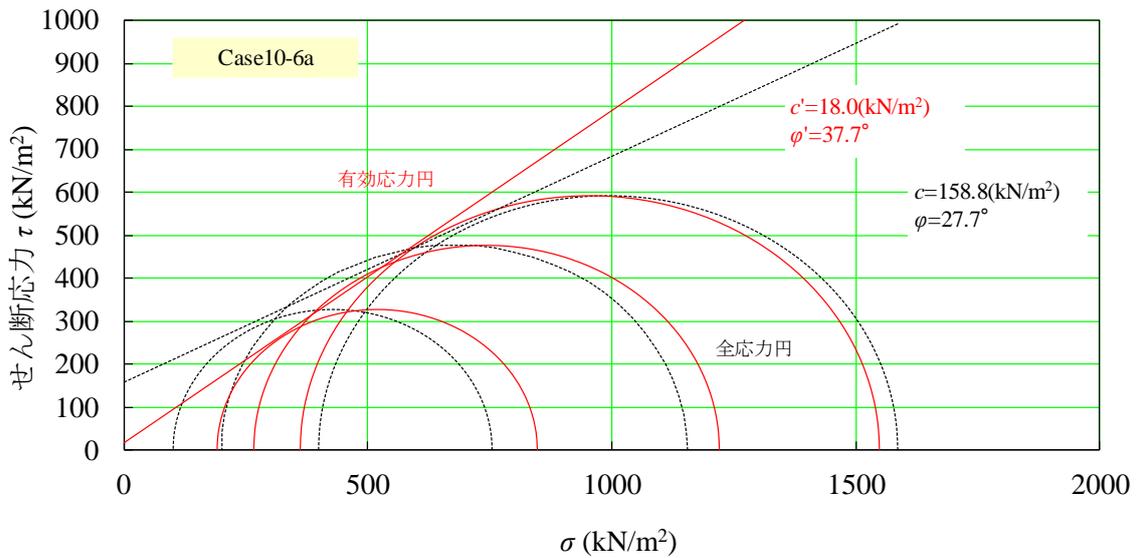


図 5.2-138 モール・クーロンの応力円 (Case10-6a)

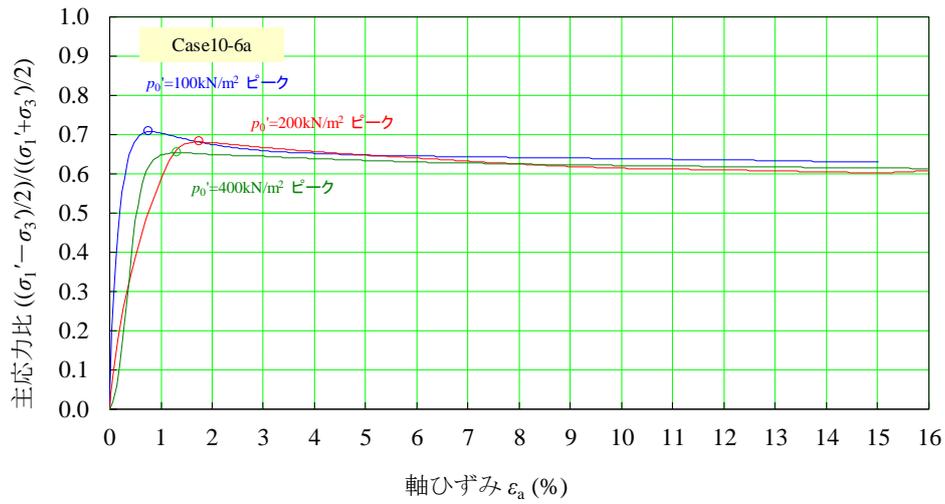


図 5.2-139 主応力比～軸ひずみ関係 (Case10-6a)

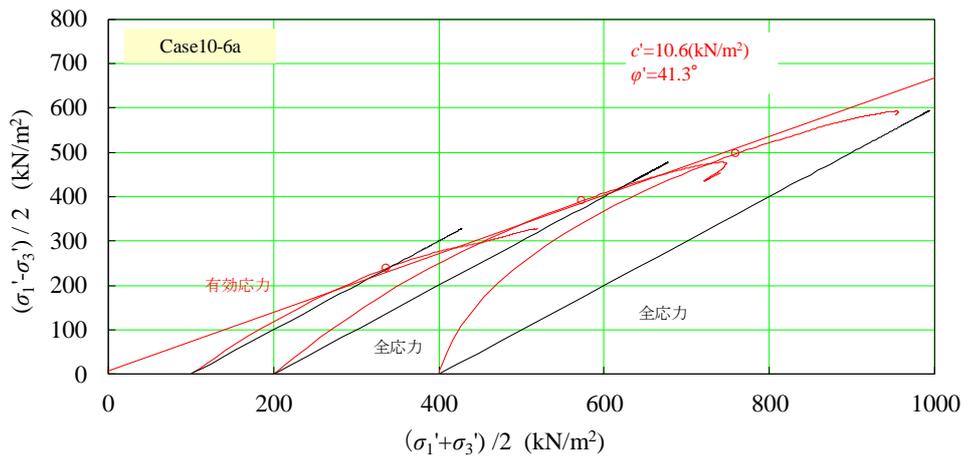


図 5.2-140 主応力経路 (Case10-6a)

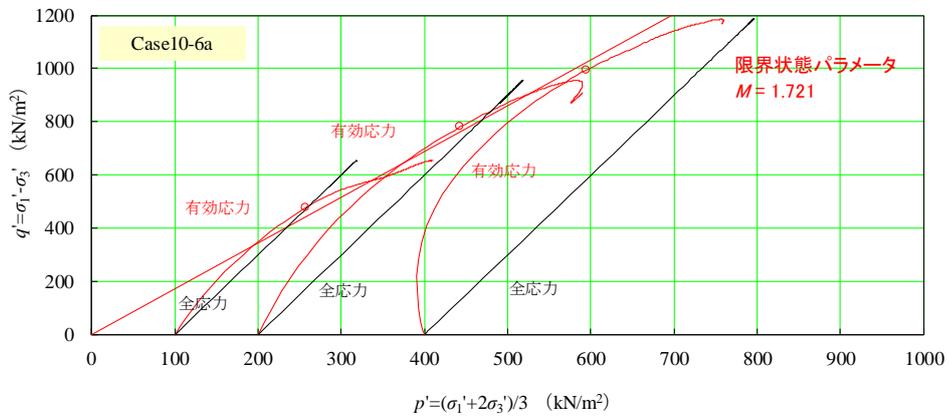


図 5.2-141 軸差応～平均主応力関係 (Case10-6a)

表 5.2-22 下部覆土の三軸圧縮強度試験結果 (Step4)

Case	混合率 (%)				モール応力円		主応力経路		限界状態 パラメータ
	粗粒 砂岩	津軽 2号	玄武岩		c' (MPa)	ϕ' (deg)	c' (MPa)	ϕ' (deg)	
			碎石	碎砂					
Case10-6a	55	10	20	15	18.0	37.7	10.6	41.3	1.721
Case10-6	55	10	20	15	52.7	34.3	24.2	40.0	1.697

(6) ベントナイトの混合率・Fuller 指数の違いによる影響評価

下部覆土でデータを採取した各ケースの試験結果をもとに、ベントナイトの混合率や Fuller 指数が締固め性・透水性・力学特性にどのように影響するのかを評価する。評価対象とした試験ケースの一覧表を表 5.2-23 に示す。表 5.2-23 には、配合と Fuller 指数をまとめた。Fuller 指数を大きくすると、図 5.2-142 に示すように粒度分布は粒径の大きい方に分布が偏向するようになる。Fuller 指数 $n=0.2$ は粒径が細かい分布となっているといえる。このような特徴を踏まえてベントナイトの混合率・Fuller 指数の違いによる影響を評価する。

表 5.2-23 下部覆土の各ケースの配合・Fuller 指数 一覧表 (比較対象ケース)

Case	Fuller	母岩		ベントナイト		購入石		
		種類	混合率	種類	混合率	種類	碎石	碎砂
							混合率	混合率
Case05-4	$n=0.4$	粗粒砂岩	20	津軽 2 号	5	玄武岩	45	30
Case05-5	$n=0.3$	粗粒砂岩	35	津軽 2 号	5	玄武岩	35	25
Case05-6	$n=0.2$	粗粒砂岩	60	津軽 2 号	5	玄武岩	20	15
Case10-4	$n=0.4$	粗粒砂岩	15	津軽 2 号	10	玄武岩	45	30
Case10-5	$n=0.3$	粗粒砂岩	30	津軽 2 号	10	玄武岩	35	25
Case10-6	$n=0.2$	粗粒砂岩	55	津軽 2 号	10	玄武岩	20	15

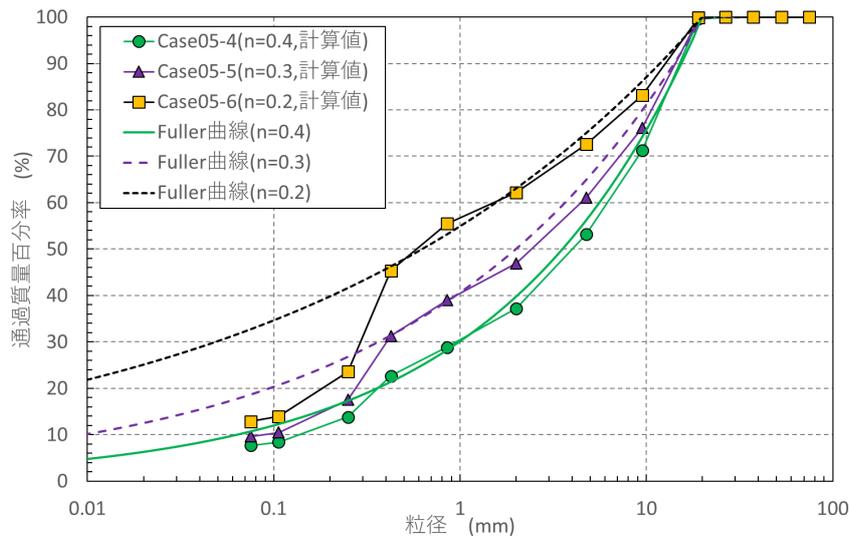


図 5.2-142 Fuller 指数が異なる粒径加積曲線の例 (Case05-4~Case05-6)

③ 締固め性への影響

図 5.2-143 に締固め曲線を比較した結果を、図 5.2-144 に最大乾燥密度と最適含水比を比較した結果を示す。Fuller 指数が高いほど、すなわち大きい粒径分が多いほど最大乾燥密度が大きくなっている。また、ベントナイトの混合率の違いによる影響は小さく、同じ Fuller 指数であればほぼ同じ最大乾燥密度となっていることがわかる。これは、ベントナイトの混合率が 5%や 10%という品配合であることが要因であると考えられ、ベントナイトの膨潤等の特徴的な挙動よりも、粒径分布等で関連する土粒子同士のかみ合わせによる影響が支配的であるといえる。

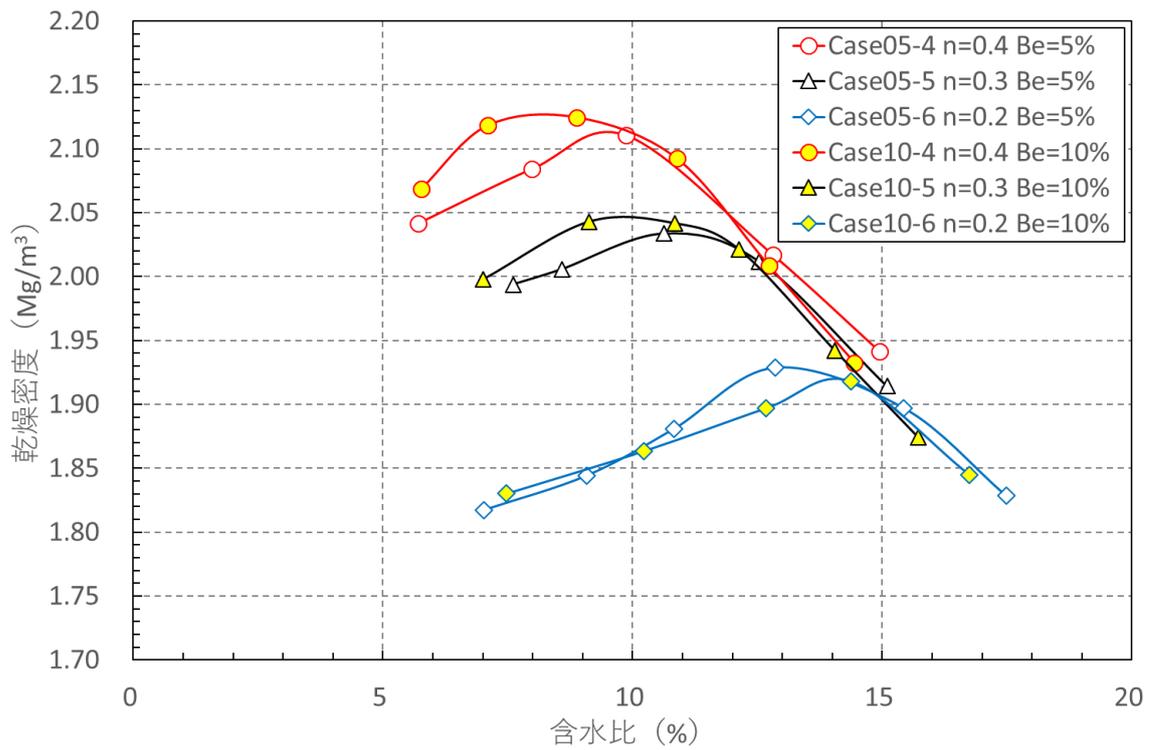


図 5.2-143 締固め曲線の比較

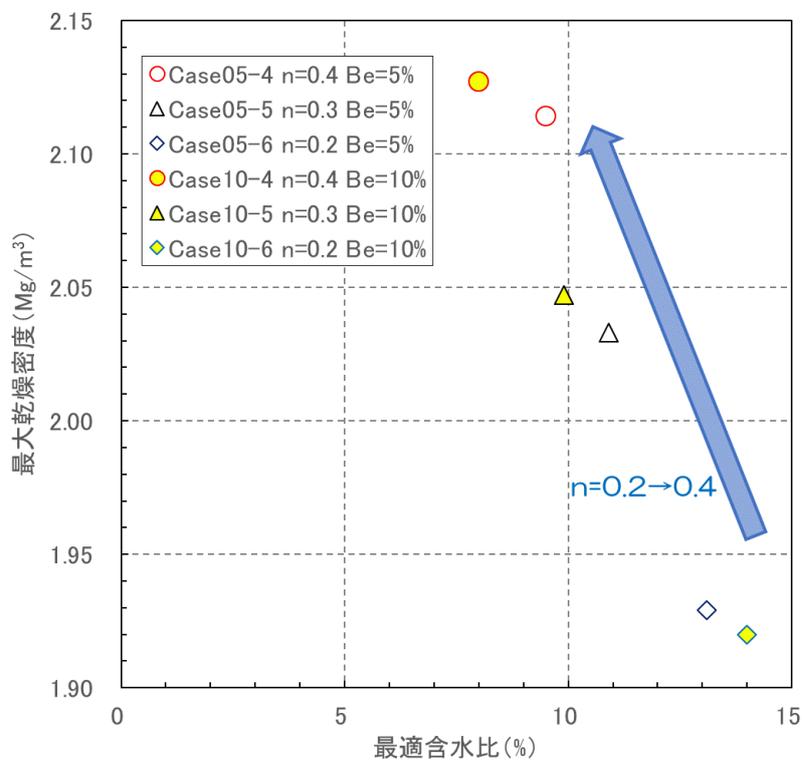


図 5.2-144 最大乾燥密度と最適含水比の比較

④ 透水性への影響

図 5.2-145 に有効粘土密度と透水係数の関係を、図 5.2-146 に有効粘土間隙比と透水係数の関係を示す。ベントナイトの混合率が上がれば透水係数も小さくなり、これはベントナイトの膨潤性が透水性に影響を与えることを示している。このようなベントナイトの膨潤による材料の低透水性への改善効果は本試験でも確認できることができた。また、Fuller 指数が大きいほど、すなわち大きい粒径分が多いほど透水係数は大きくなっている。これは、礫のように粒径が大きい土粒子分が多いほど供試体内部の空隙径分布が大きいものに偏る傾向になることが要因であると考えられる。

混合土中では、メニスカスの形成により土粒子同士が結びつき、土粒子と土粒子の間に空隙を形成している。一般に粒径が小さい土粒子が多くなれば小さい粒子同士の結びつきの頻度が多くなり、形成される空隙の大きさ＝空隙径は小さいものに偏った分布となると考えられる。これにより、Fuller 指数が小さいケースでは、礫分が相対的に多いケースよりも通水しにくい空隙が多数形成され、透水係数も小さくなると考えられる。

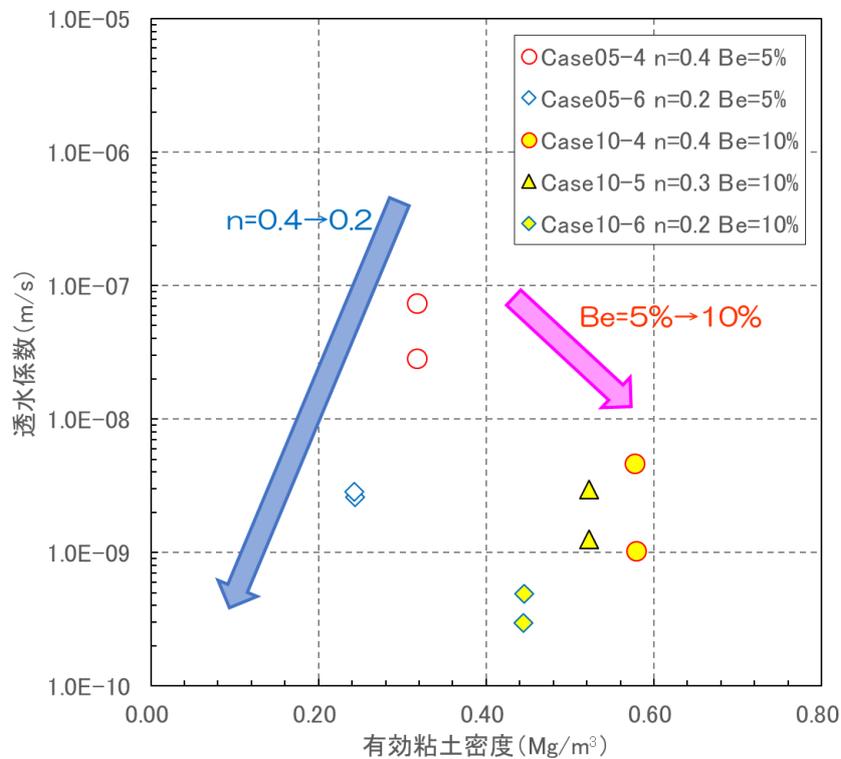


図 5.2-145 有効粘土密度と透水係数の関係による比較

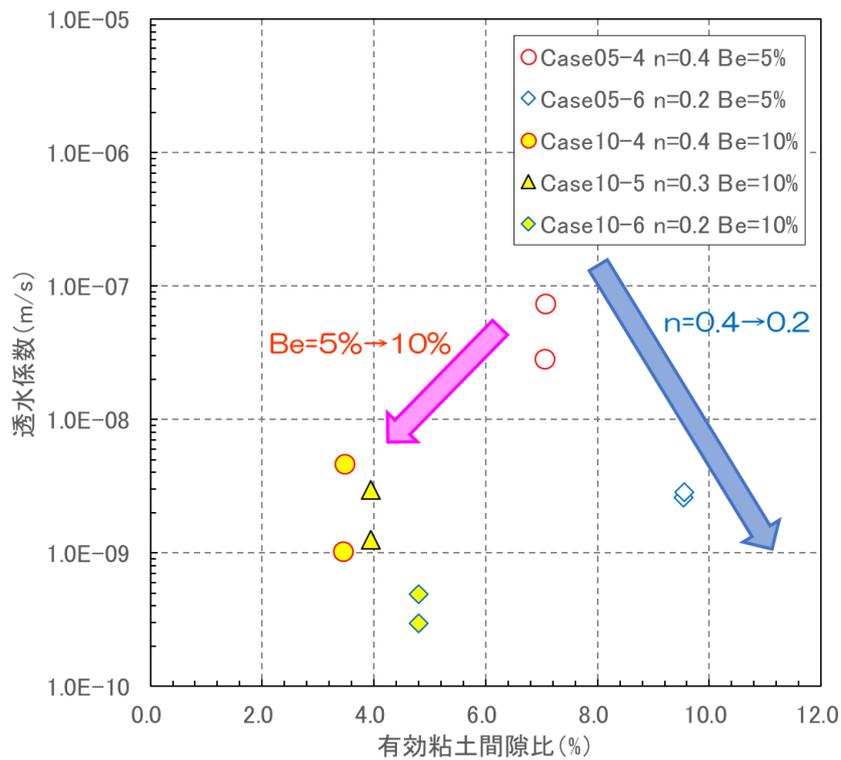


図 5.2-146 有効粘土間隙比と透水係数の関係による比較

⑤ 静的力学特性（三軸圧縮強度試験）への影響

三軸圧縮試験中に得られる軸ひずみ～軸差応力関係の曲線の最大軸差応力の 50%強度における軸ひずみを曲線より求め、50%強度をその時の軸ひずみで除算することで一軸圧縮試験のような割線静弾性係数 E_{50} を求めた。図 5.2-147 に割線静弾性係数 E_{50} と乾燥密度の関係を示す。Fuller 指数が大きくなると乾燥密度も大きくなり、それに伴い割線静弾性係数も大きくなっている。また、同じ供試体でも圧密圧力が大きくなると割線静弾性係数 E_{50} は大きくなっている。同じ Fuller 指数でもベントナイト混合率が大きくなると割線静弾性係数 E_{50} は小さくなる傾向が見られた。

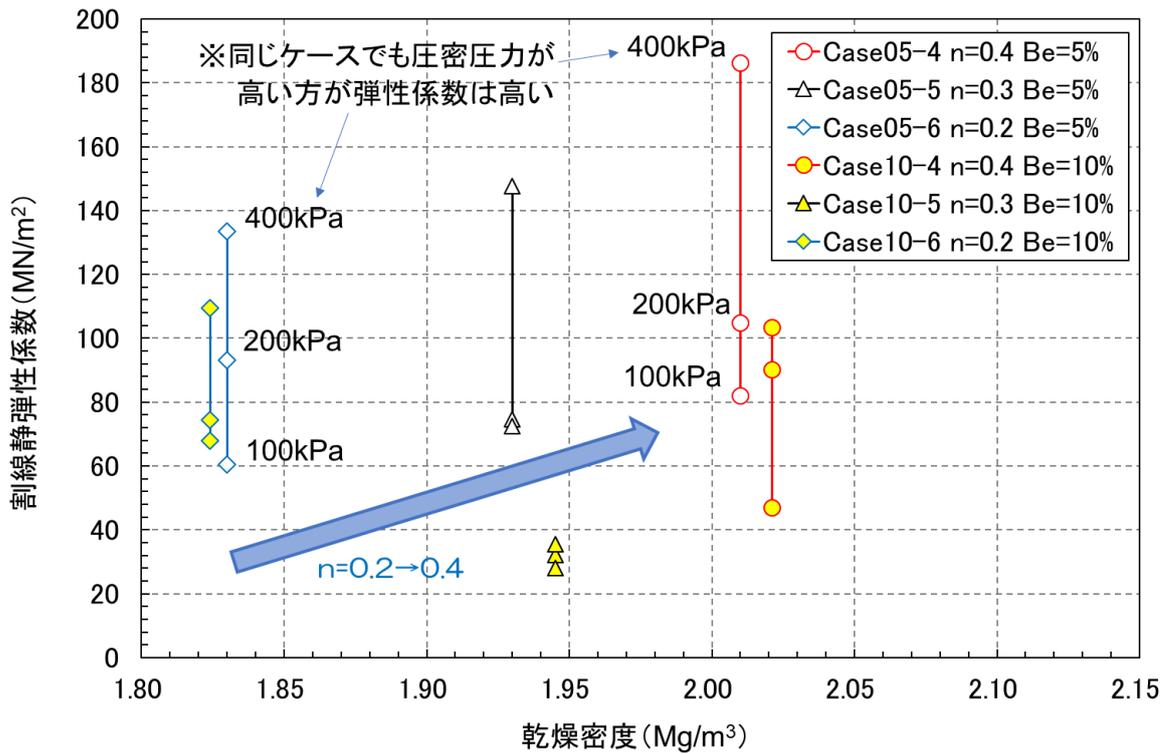


図 5.2-147 割線静弾性係数 E_{50} と乾燥密度の関係

図 5.2-148 に粘着力 c' と乾燥密度の関係、図 5.2-149 に内部摩擦角 ϕ' と乾燥密度の関係、図 5.2-150 に限界状態パラメータ M と乾燥密度の関係を示す。

図 5.2-148 に示した粘着力 c' は特に特徴的な傾向は見られなかった。

図 5.2-149 に示した内部摩擦角 ϕ' はベントナイトの混合率よりも乾燥密度自体の影響が大きいと思われ、Fuller 指数が大きくなると乾燥密度も大きくなり、それに伴い内部摩擦角 ϕ' も大きくなっている。ただし、Case05-4 のみはそのようなトレンドから外れ、小さめの値となった。

図 5.2-150 に示した限界状態パラメータ M は、Fuller 指数が大きいほど、すなわち乾燥密度が大きいほど、また、ベントナイト混合率が小さいほど、大きくなる傾向が見られるが、Fuller 指数が 0.2 のケースではベントナイト混合率が 10% の方が大きくなる結果となった。

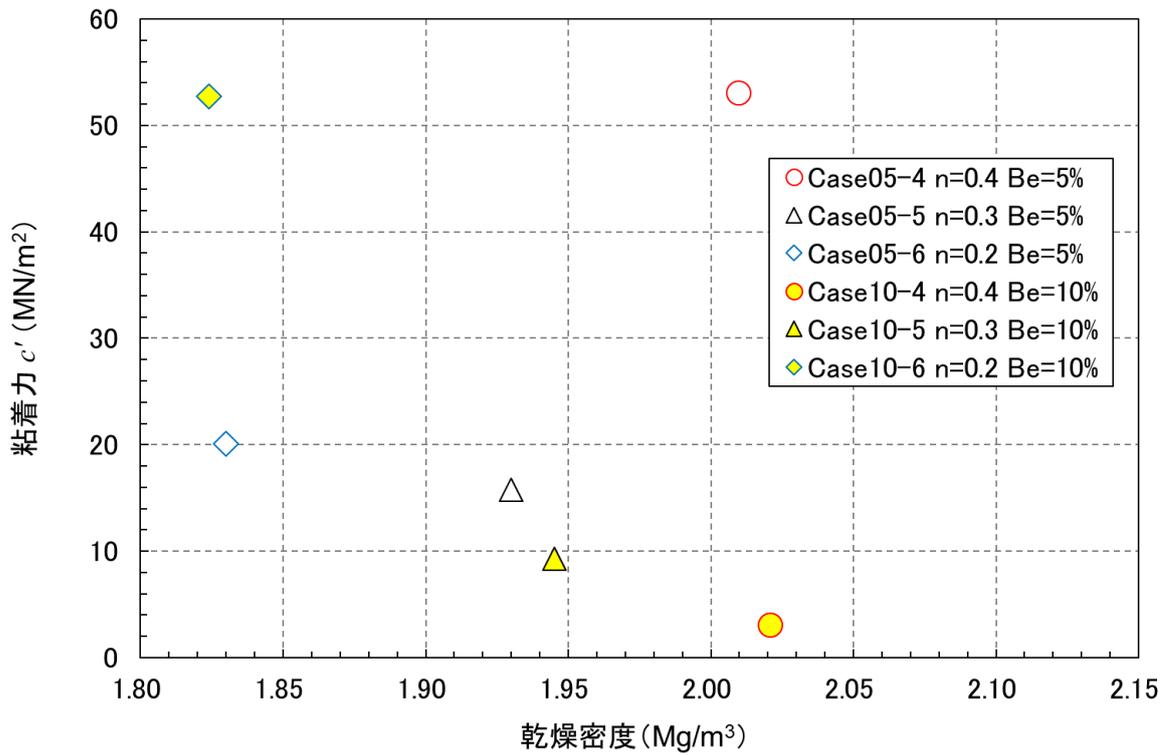


図 5.2-148 粘着力 c' と乾燥密度の関係

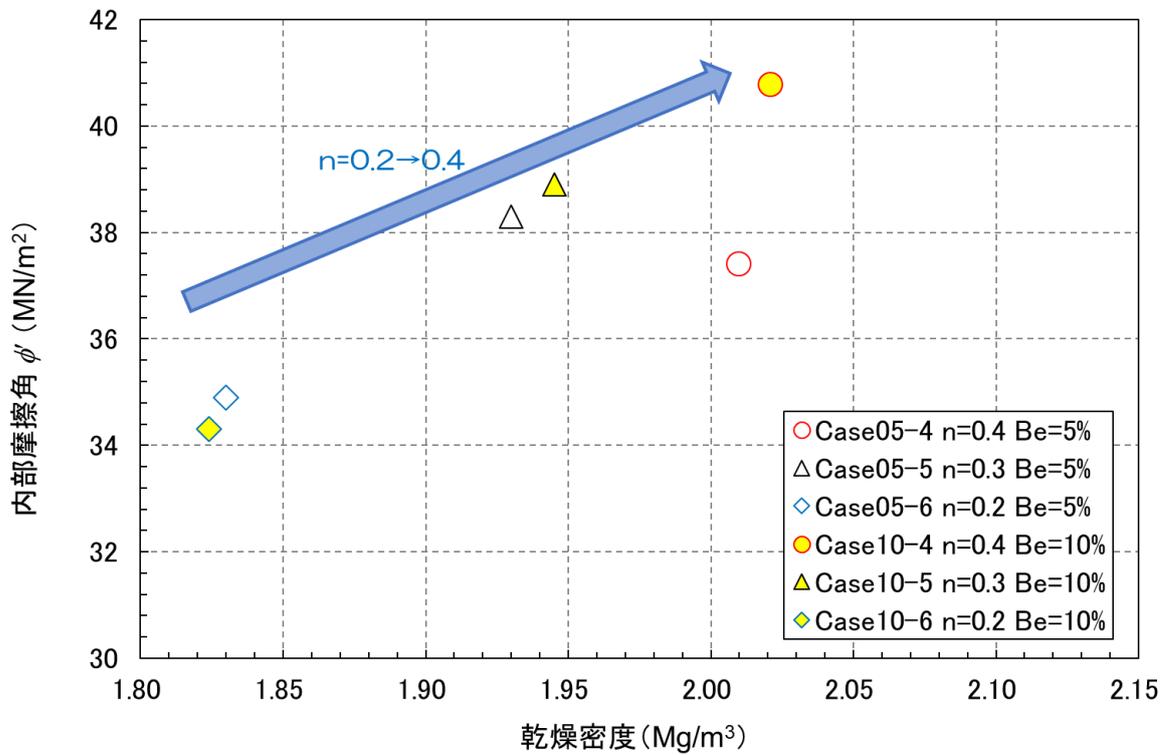


図 5.2-149 内部摩擦角度 ϕ' と乾燥密度の関係

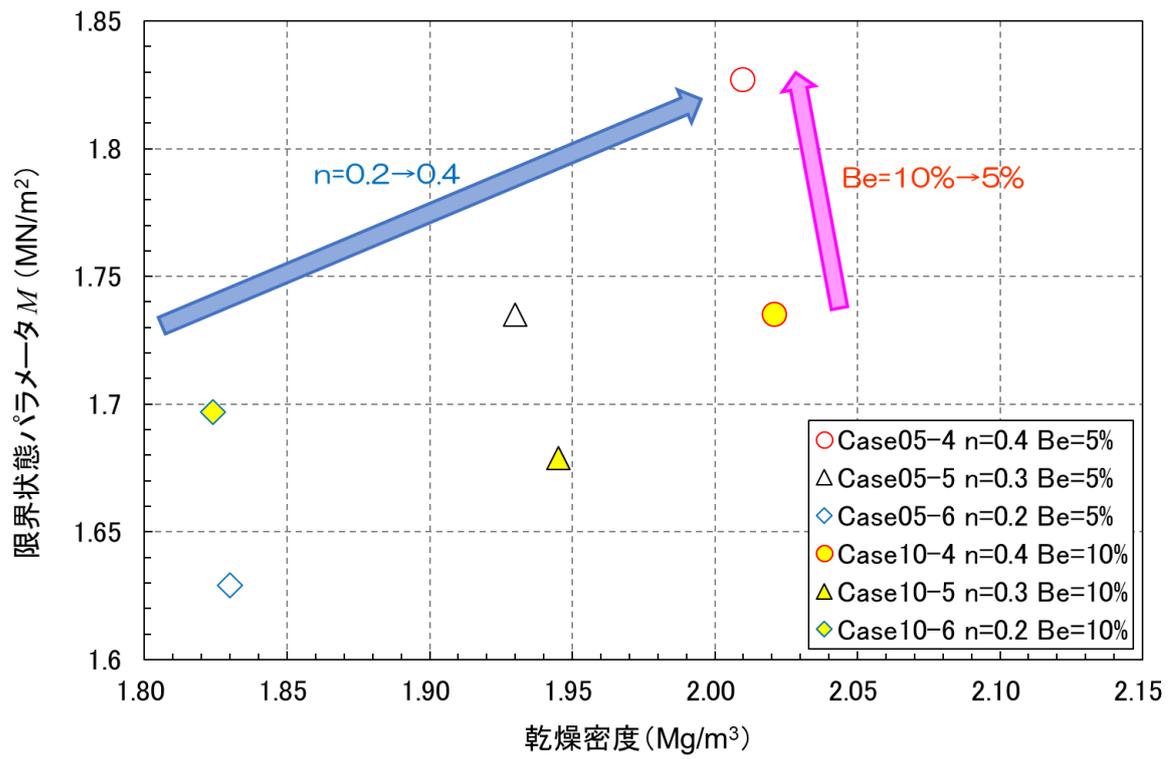


図 5.2-150 限界状態パラメータ M と乾燥密度の関係

⑥ 動的力学特性（動的変形特性）への影響

図 5.2-151 に乾燥密度と等価せん断剛性 G_0 の関係を示す。同じベントナイト混合率で比較すると Fuller 指数が大きいほど、すなわち乾燥密度が大きいほど等価せん断剛性 G_0 は大きくなった。同じ Fuller 指数で比較するとベントナイト混合率が大きくなると、等価せん断剛性 G_0 は小さくなるという結果であった。

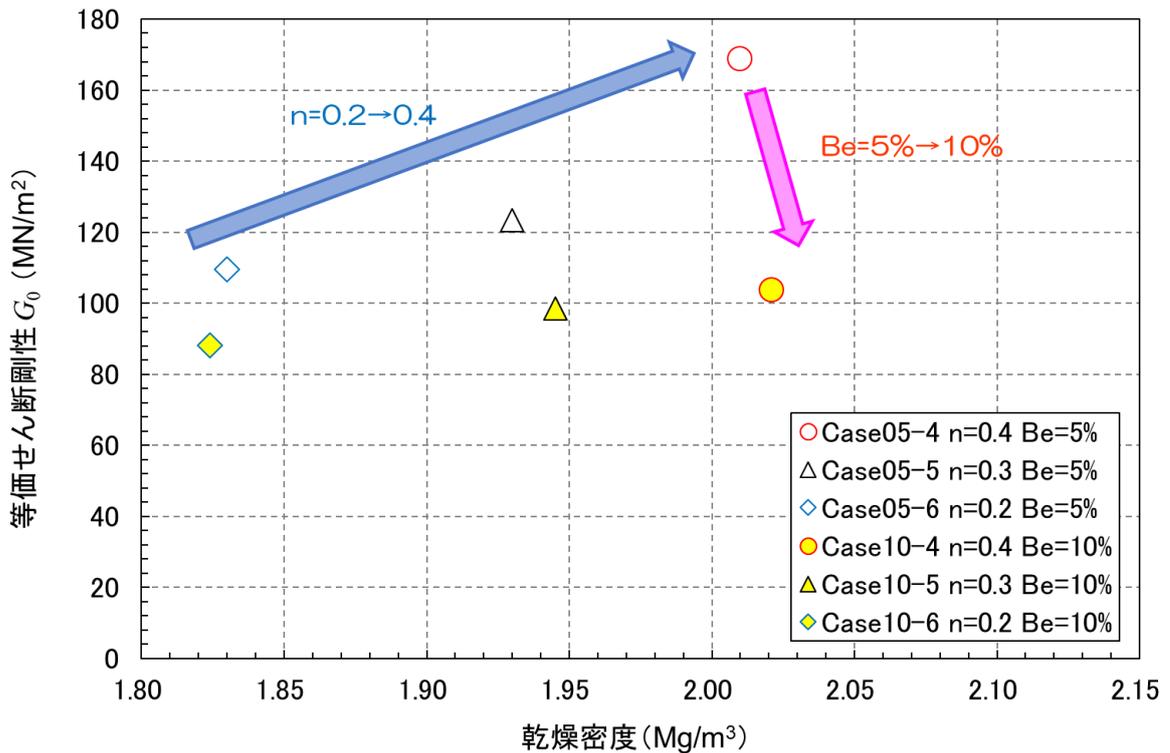


図 5.2-151 等価せん断剛性 G_0 と乾燥密度の関係

⑦ 液状化強度への影響

図 5.2-152 に乾燥密度と各ケースの液状化強度比 R_{L20} の関係を示す。ベントナイト混合率の影響は小さく、Fuller 指数が小さいほど、すなわち乾燥密度が小さい方が液状化強度比 R_{L20} は大きくなる傾向を示した。しかしながら、Fuller 指数が 0.3 という中間の値のケースが最も小さくなった。

図 5.2-153 に残留強度と各ケースの液状化強度比 R_{L20} の関係を示す。残留強度は三軸圧縮試験 ($\bar{C}U$ 条件、圧密圧力 100kPa) の軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ の時の軸差応力より求めた。図 5.2-153 には 2016 年度に実施した粗粒砂岩 50%+碎石 50%のベントナイトを含まない結果も示した。ベントナイト混合率の影響は小さく、Fuller 値が小さく、残留強度

が大きいほど、液状化強度比は大きくなる傾向を示した。

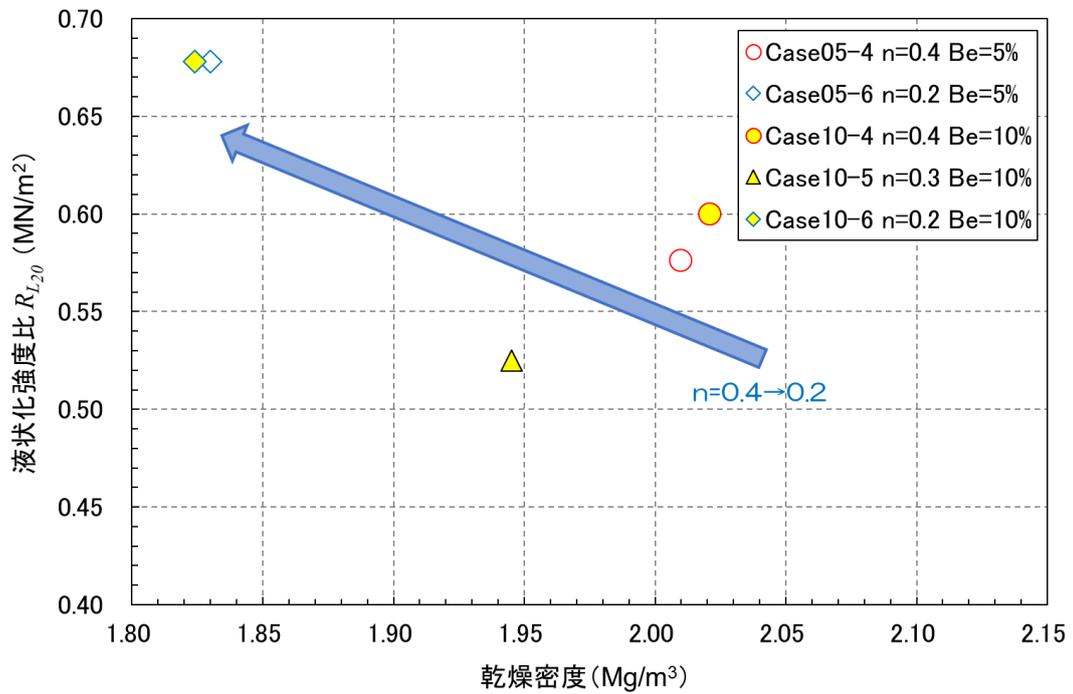


図 5.2-152 液状化強度比 R_{L20} と乾燥密度の関係

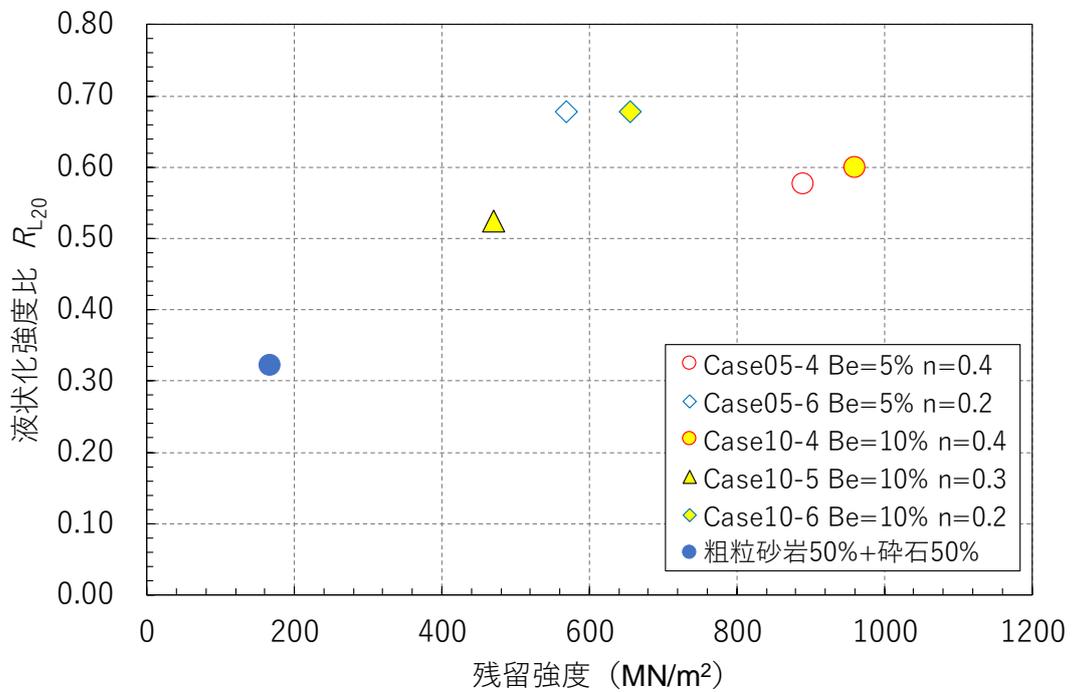


図 5.2-153 液状化強度比 R_{L20} と残留強度の関係

⑧ 弾性波速度への影響

図 5.2-154 に乾燥密度と弾性波速度 V_P 、 V_S の関係を示す。ベントナイト混合率、Fuller 指数によらず、弾性波速度に大きな差異は見られなかった。ただし、Fuller 指数が 0.4 のケースでは、ベントナイト混合率が 10% の時の方が弾性波速度 V_P 、 V_S は小さくなる結果となった。

弾性波速度と湿潤密度より計算した動ポアソン比 ν_d を図 5.2-155 に、動せん断剛性 G_d を図 5.2-156 に、動弾性係数 E_d を図 5.2-157 に示す。動ポアソン比 ν_d は Fuller 指数が大きくなると小さくなる傾向が見られる。ベントナイトの混合率の影響は Fuller 指数が 0.4 のときに大きく現れ、混合率が 10% の時の方が動ポアソン比 ν_d は小さくなった。

動せん断剛性 G_d 、動弾性係数 E_d についてもベントナイト混合率の影響を受けるのは Fuller 指数が 0.4 の場合のみで、ベントナイトの混合率が 10% の時の方が小さくなった。また、同じベントナイト混合率で比較すると、Fuller 指数が大きくなると動せん断剛性 G_d 、動弾性係数 E_d も大きくなる傾向が見られた。

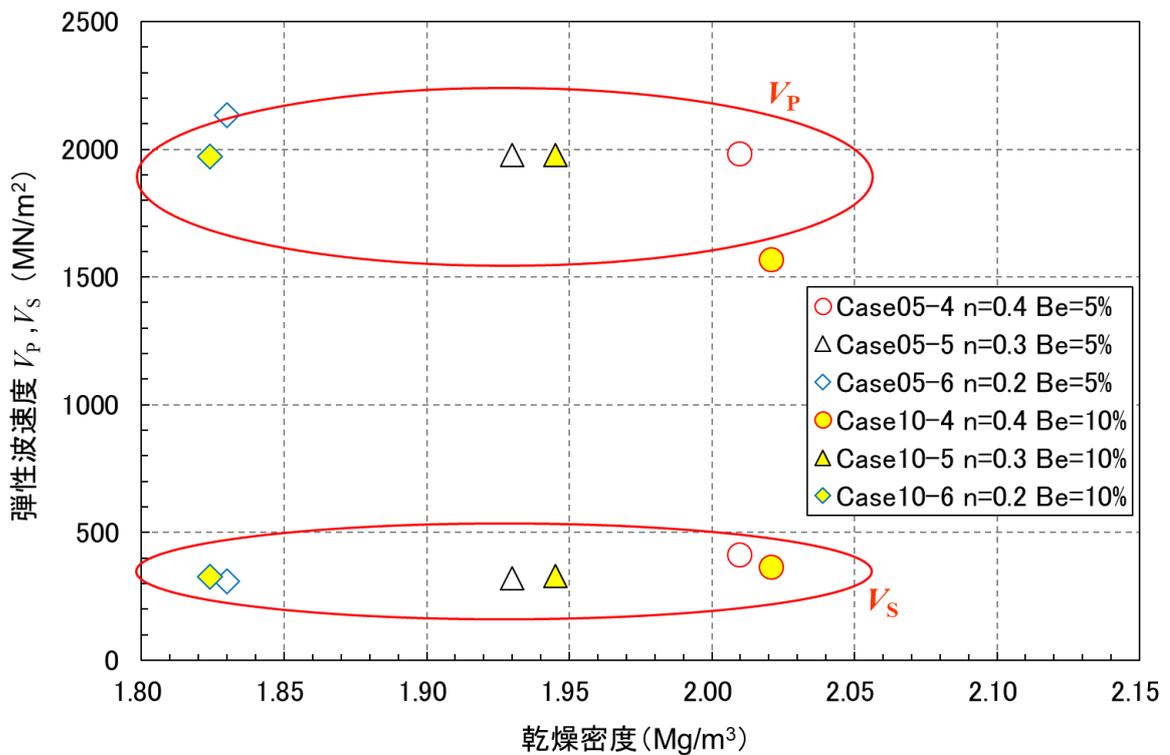


図 5.2-154 弾性波速度と乾燥密度の関係

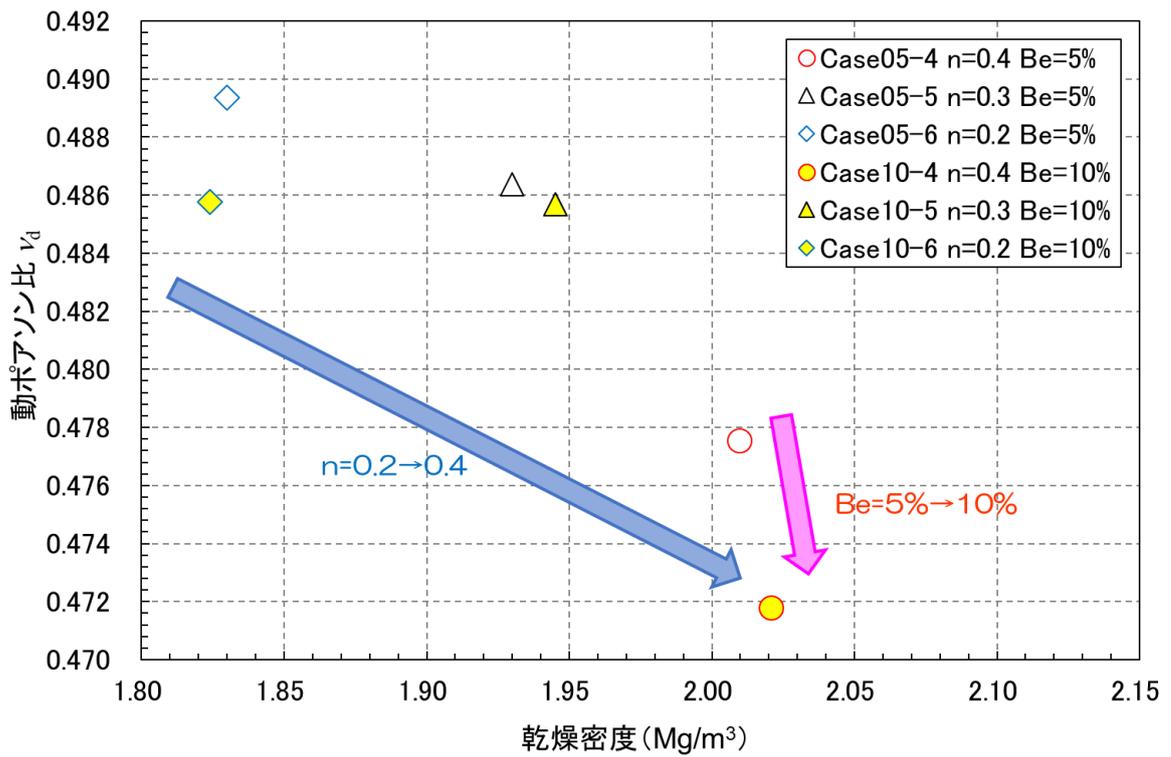


図 5.2-155 動ポアソン比 ν_d と乾燥密度の関係

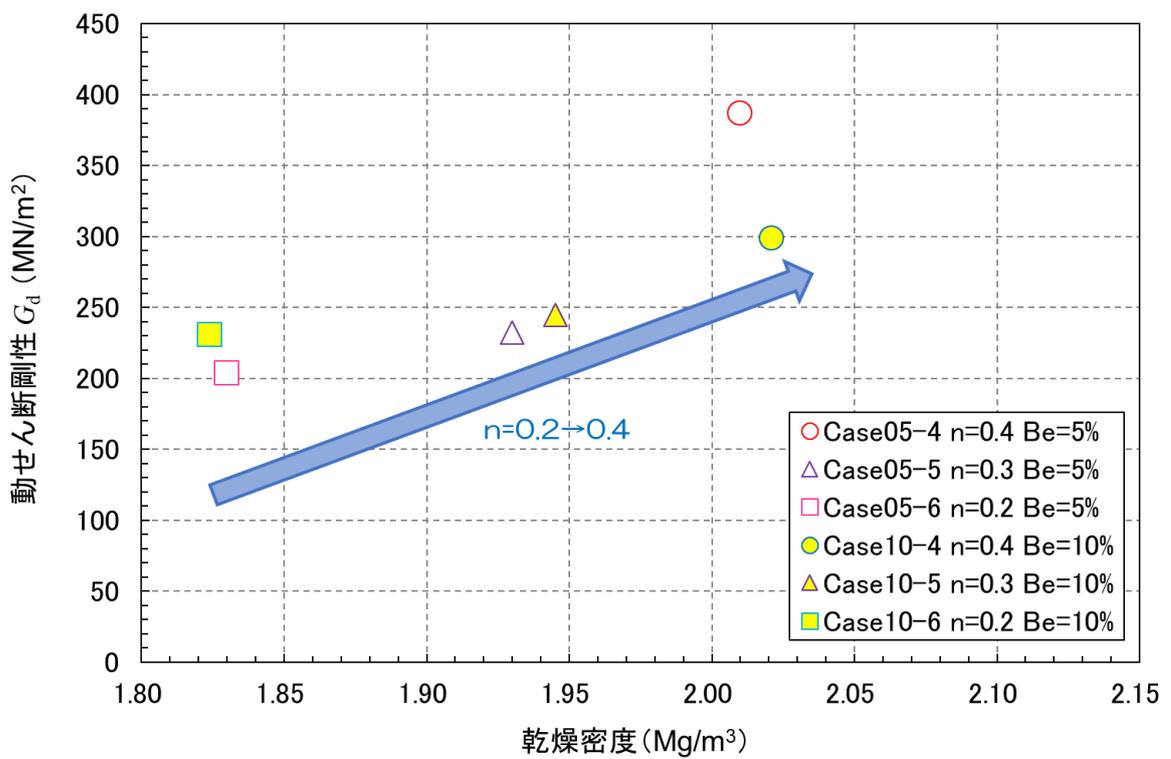


図 5.2-156 動せん断剛性 G_d と乾燥密度の関係

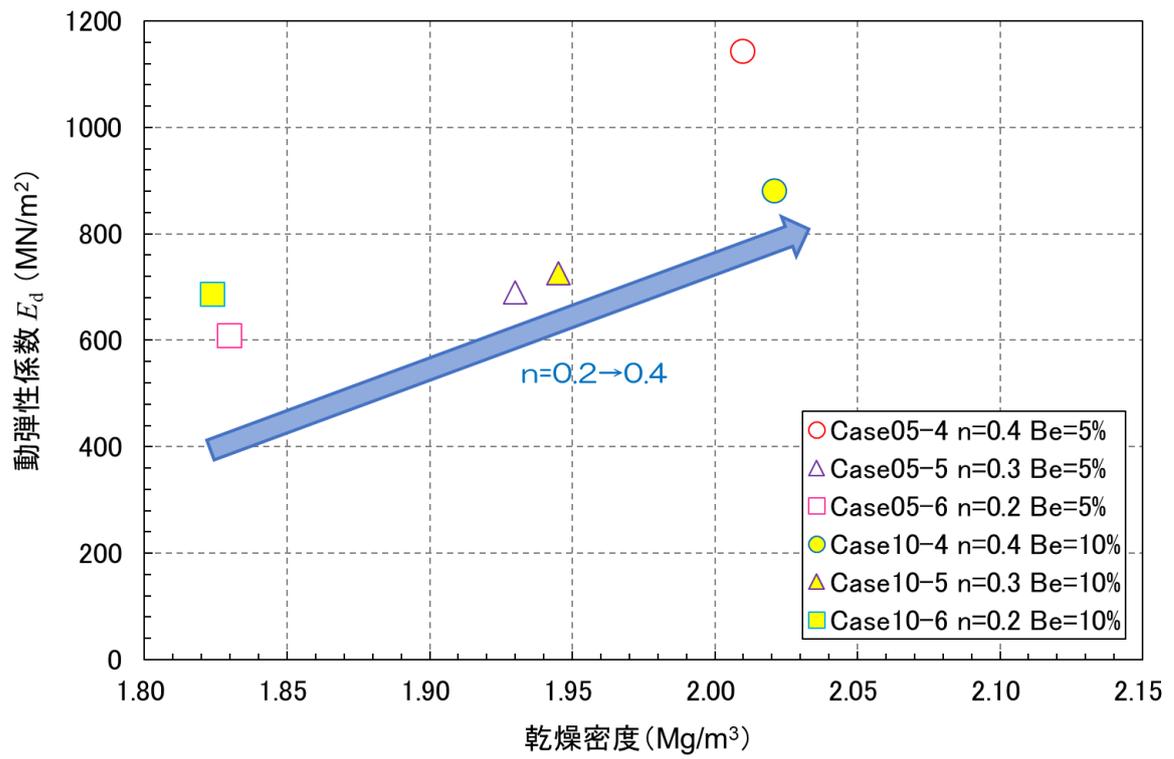


図 5.2-157 動弾性係数 E_d と乾燥密度の関係

5.2.3 上部覆土

(1) 要求性能

上部覆土に要求される性能は第3章に示した通りであり、主な仕様は以下の通り。

- ・ 材料 現地発生土に必要な応じてベントナイト、砕砂および砕石を混合
- ・ 透水係数（施工時点）：廃棄物埋設地周辺の第四紀層の透水係数と同程度
- ・ 厚さ 難透水性覆土および下部覆土とあわせて埋設設備上面から 6m 以上

(2) 設計方針

上部覆土の要求性能としては、周辺地盤と同等の透水係数 ($1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/s}$) とすることが設定されている。上部覆土が周辺地盤よりも低い透水係数となった場合、鷹架層の流量が増加する、すなわち、埋設設備に流入する流量が増加することになる。また、液状化防止のために締固め度 90%以上とする必要がある。この透水特性と液状化抵抗性を考慮した上部覆土仕様を検討する。上部覆土の母材は現地発生土である軽石凝灰岩とする。軽石凝灰岩を用いたこれまでの室内試験結果をまとめた上で、上述の仕様を満足する材料仕様（配合）について検討することとする。

① 軽石凝灰岩のサンプリングおよび品質確認

表 5.2-24 にこれまでの室内試験で使用してきた軽石凝灰岩の概要を示す。軽石凝灰岩は 2009 年度（低配合ベントナイトの施工特性試験（2号埋設施設（9,10群）の基本設計のうち施工特性試験）、2010 年度（ベントナイト系材料の覆土施工性確認試験）、2015 年度（埋設施設の覆土性能評価に関する検討（2015 年度））にサンプリングを行っている。2009 年度は、図 5.2-158 に示す掘削土の仮置き場から 2009 年 4 月 16 日に採取している。写真 5.2-1 に採取場所を、写真 5.2-2 に採取の状況を示す。2010 年度も図 5.2-159 に示す掘削土の仮置き場から 2010 年 7 月 29 日に採取している。写真 5.2-3 に採取状況を示す。2010 年度の材料は転圧施工試験に使用された。この材料を用いた室内試験は 2012 年度（埋設施設の覆土仕様に関する検討）に実施されている。転圧施工試験の状況を写真 5.2-4 に示す。2015 年度は、2015 年 10 月 19 日に構内の橋脚耐震補強工事現場から採取した。採取位置を図 5.2-160 に示す。これまでと異なり、掘削土ではなく、軽石凝灰岩が露頭している箇所からのサンプリングである。露頭箇所を写真 5.2-5 に示す。採取前に写真 5.2-6 に示すようにエンジン式コンプレッサー等を使用して軽石凝灰岩表面の洗浄を行った。そして、写真 5.2-7 に示すように電動ピック等を使用して適度な塊に割り採取した。構内での作業は、適度な塊に割る程度とし、小塊にす

る作業は試験室に持ち帰った後に実施した。適度な塊になった軽石凝灰岩はトンパック等に入れ搬出した。最大で10数cmの大きさであったため室内試験に供するため人力で粉砕した。粉砕の際は、最大粒径が9.5mmとなるように粉砕した。2019年度は、軽石凝灰岩のサンプルを提供して頂き、その室内試験を一部実施した。室内試験に使用した軽石凝灰岩を整理すると表5.2-24の通りとなる。

表 5.2-24 室内試験に使用した軽石凝灰岩

実施年度	採取年度	採取時の状態	粒度調整	最大粒径 (mm)
2009	2009	掘削土 (粉砕)	分級	19
2012	2010	掘削土 (粉砕)	分級	19
2015	2015	岩塊	粉砕	9.5
2019	2019	岩塊	粉砕	19

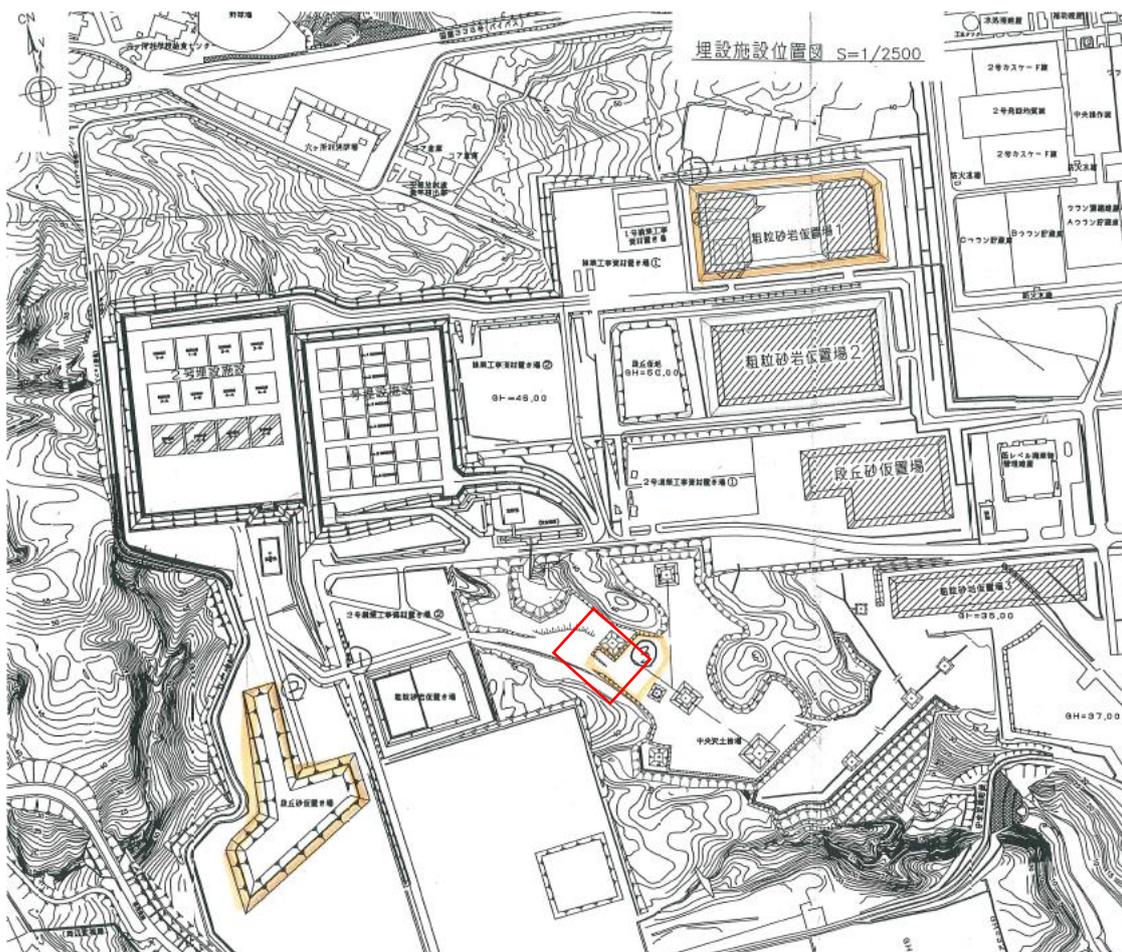


図 5.2-158 軽石凝灰岩採取位置 (2009 年度)



写真 5.2-1 軽石凝灰岩採取場所（2009 年度）



写真 5.2-2 軽石凝灰岩採取状況（2009 年度）

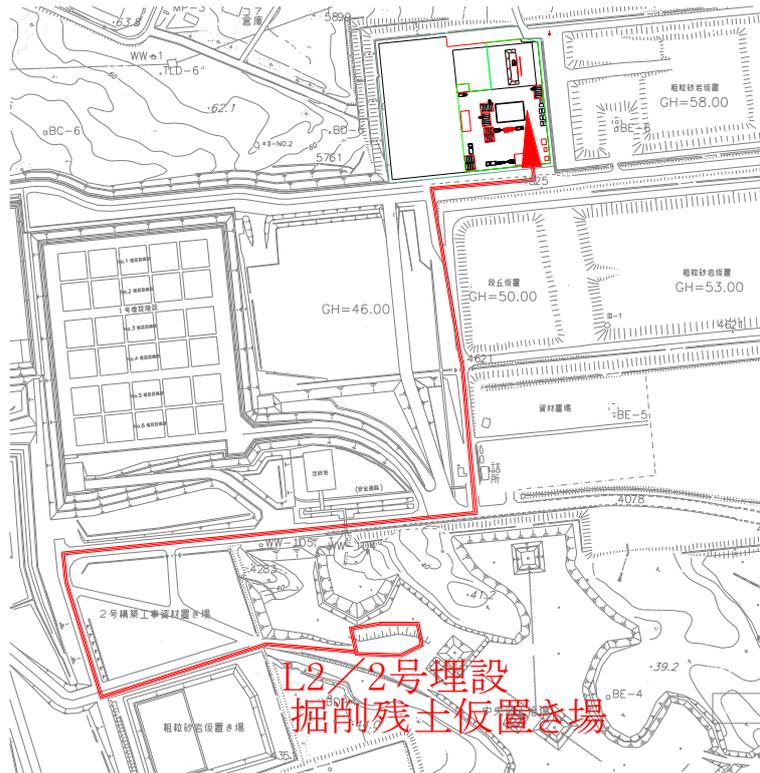


図 5.2-159 軽石凝灰岩採取位置 (2010 年度)



写真 5.2-3 軽石凝灰岩採取状況 (2010 年度)



写真 5.2-4 軽石凝灰岩の転圧試験 (2010 年度)

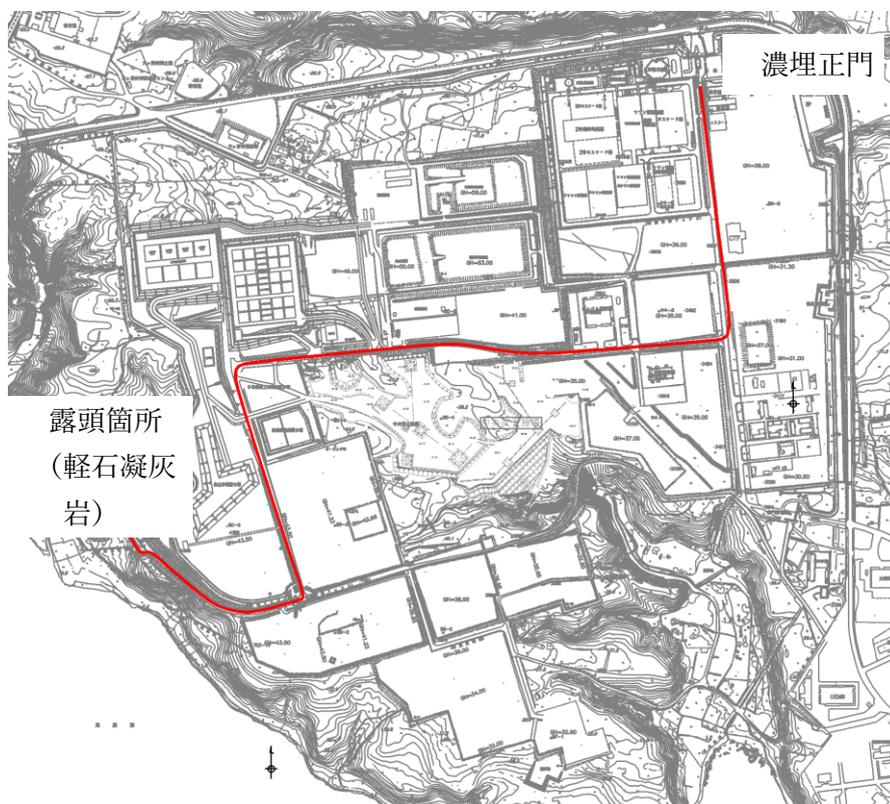


図 5.2-160 軽石凝灰岩採取位置 (2012 年度)



写真 5.2-5 軽石凝灰岩露頭箇所（2015 年度）



写真 5.2-6 採取前の洗浄状況（2015 年度）



写真 5.2-7 軽石凝灰岩の採取状況（2015 年度）

試験実施年度の軽石凝灰岩の粒径加積曲を図 5.2-161 に示す。2015 年度の軽石凝灰岩は粉碎し最大粒径が 9.5mm の材料のみを使用した。2019 年度も粉碎しているが、最大粒径は 19mm とした。2009 年度および 2012 年度に使用した材料は、掘削土を 19mm での分級を実施し使用した。材料の準備状況が異なるが、細粒分含有率は 20～45% と細粒分を多く含む材料である。

軽石凝灰岩単体に対する締固め試験は 2009 年度、2012 年度、2015 年度に実施されている。結果を図 5.2-162 に示す。2015 年度のみ C 法でも実施されているが、各年度で実施された A 法の結果を比較すると 2009 年度と 2015 年度は近い結果であったが 2012 年度は若干最大乾燥密度が低い値であった。軽石凝灰岩に碎石等を混合した材料の締固め試験は 2015 年度に続き、2016 年度（1 号埋設施設 7・8 群に係る基本設計等のうちその他覆土の力学物性取得試験）にも実施された。この際には、2015 年度に採取された軽石凝灰岩を用いて試験が実施された。碎石を混合した材料の締固め試験結果を図 5.2-163 に示す。2015 年度と 2019 年度の軽石凝灰岩で大きく結果は違っている。なお、表 5.2-25 には、各年度の材料の基本物性を示す。現在、試験に使用できる材料（在庫のある材料）は 2015 年度採取分と 2019 年度採取分であるが、2015 年度の方が掘削土（2009 年度採取分等）に近い結果であるため、以降の試験には 2015 年度採取分の材料を使用する。

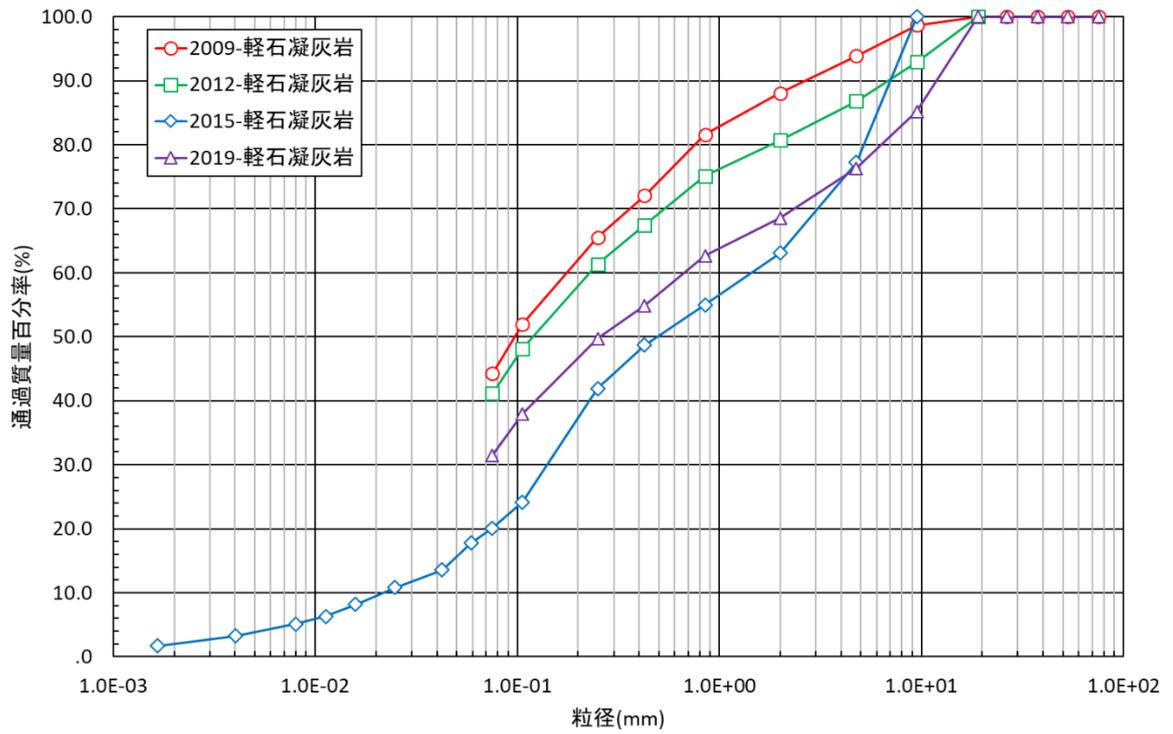


図 5.2-161 軽石凝灰岩の粒径加積曲線

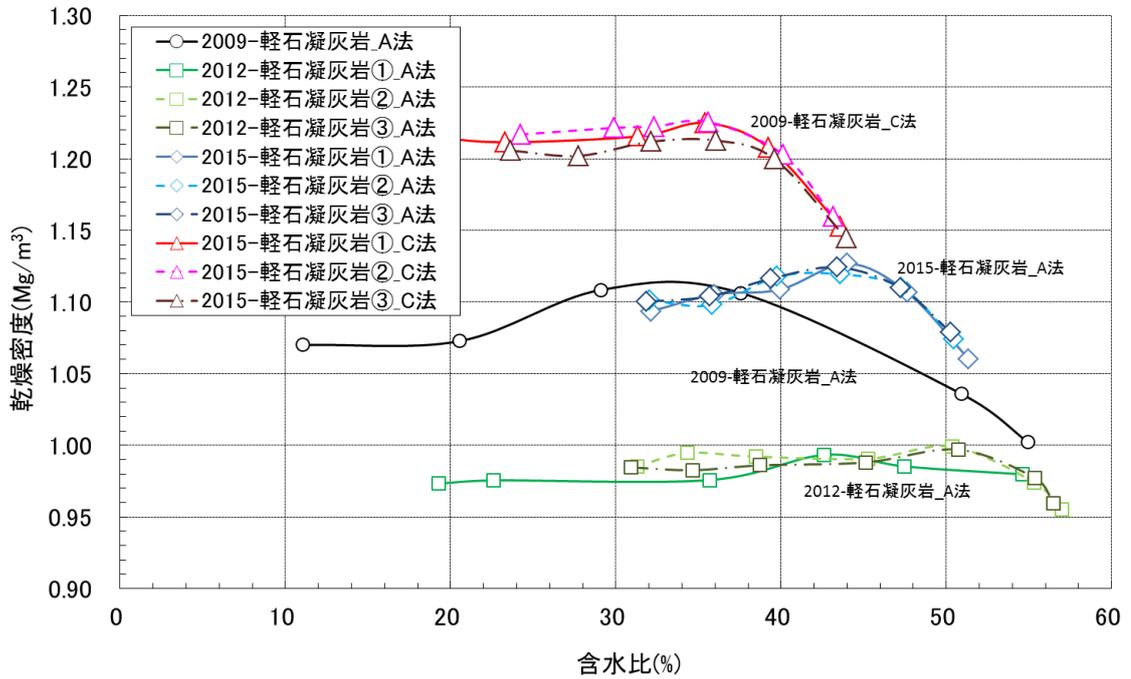


図 5.2-162 軽石凝灰岩の締固め曲線

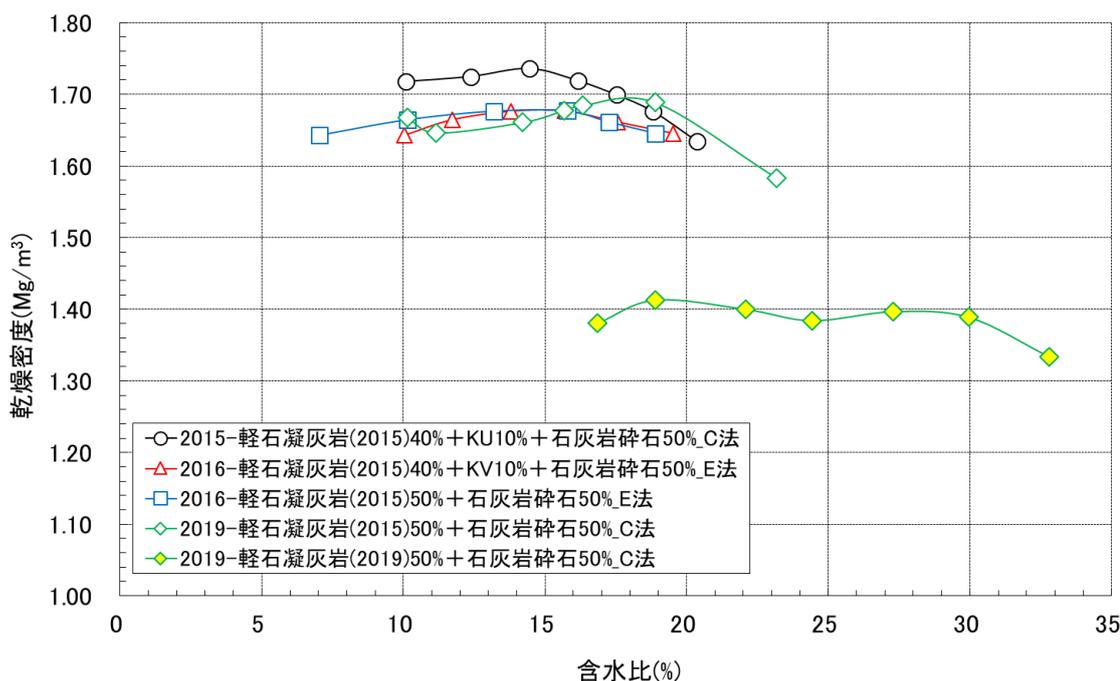


図 5.2-163 軽石凝灰岩混合材料の締固め曲線

表 5.2-25 室内試験に使用した軽石凝灰岩の基本特性

測定値	2009年度	2010年度	2012年度	2015年度	2019年度
土粒子密度 (Mg/m³)	2.348	—	2.315	2.439	2.365
自然含水比 (%)	40.6	45.9	55.9	36.2	63.3

上部覆土に用いる軽石凝灰岩は、細粒分（粒径 $75\mu\text{m}$ ）が多く含まれるため、軽石凝灰岩単体でも透水係数は 10^{-8}m/s オーダーと低い透水性を示す。また、軽石が含まれるため、単位体積重量が 1.3Mg/m^3 と軽く、拘束圧および液状化強度増加の目的で碎石を 50%混合している。そのため、周辺地盤（第四紀層）と同等の透水係数とするためには、低透水性に影響する細粒分含有率を低減する必要がある。

細粒分含有率の低減方法は、以下の方法が考えられる。

- ・ 軽石凝灰岩を分級し、細粒分含有率を制御する。
- ・ 混合土（軽石凝灰岩、碎石）のうち、軽石凝灰岩の混合割合を低減することで細粒分含有率を制御する。

- ・ 上記のうち、碎石の混合率が増加すると混合土が不均質になることから、品質管理が困難となる。よって、軽石凝灰岩の一部を砕砂（荒目）に置き換えることで、細粒分含有率を制御する。

② 軽石凝灰岩と碎石の混合土の試験結果

軽石凝灰岩（2015年度採取分）と碎石（八戸産石灰石 2005）の混合土の締固め試験結果を図 5.2-164 に示す。なお、2015年度、2016年度にも軽石凝灰岩を用いた材料の締固め試験は実施されており、その結果との比較を示したものが図 5.2-165 である。各凡例の試験条件は表 5.2-26 の通りである。使用した軽石凝灰岩は、全て 2015 年度に採取したものである。図 5.2-165 より、軽石凝灰岩単体の場合は、A 法と C 法での差は最大乾燥密度で $0.1\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度と小さいことが分かる。ベントナイトを 5~10% 混合すると若干、最大乾燥密度は大きくなっている。軽石凝灰岩に碎石を混合すると最大乾燥密度は $1.7\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度まで大きくなる。碎石を混合している場合でもベントナイトを混合すると最大乾燥密度は若干大きくなっている。なお、C 法と E 法で結果に大きな差は無い。

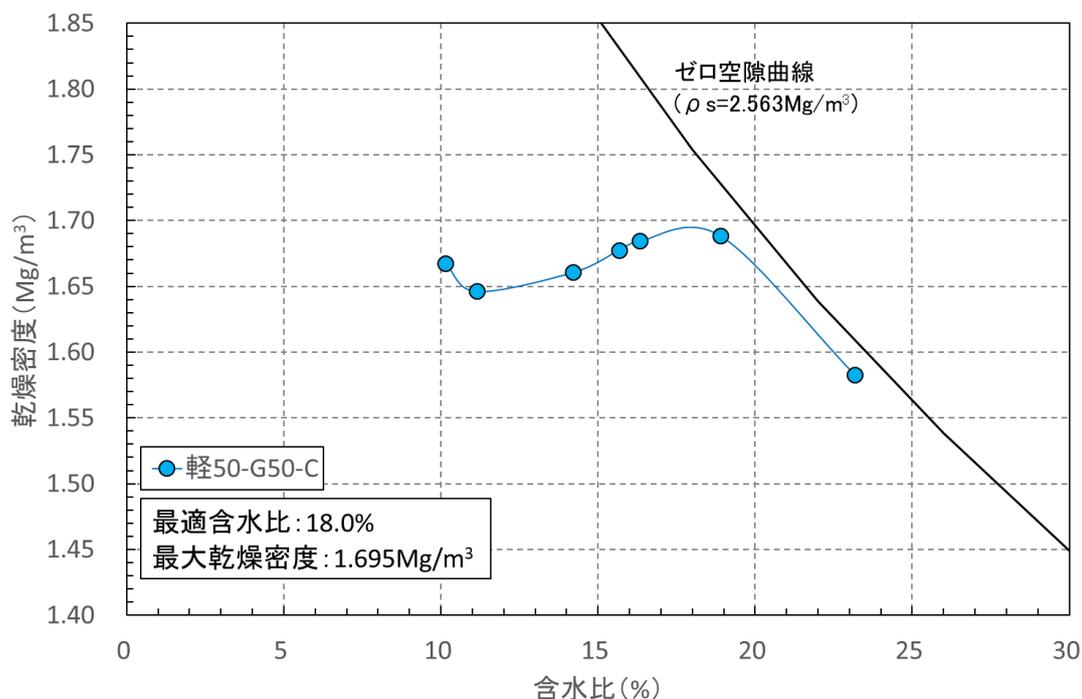


図 5.2-164 軽石凝灰岩と碎石の混合材料（軽石凝灰岩（2015年度採取）：石灰岩碎石 2005=50：50）の締固め試験結果

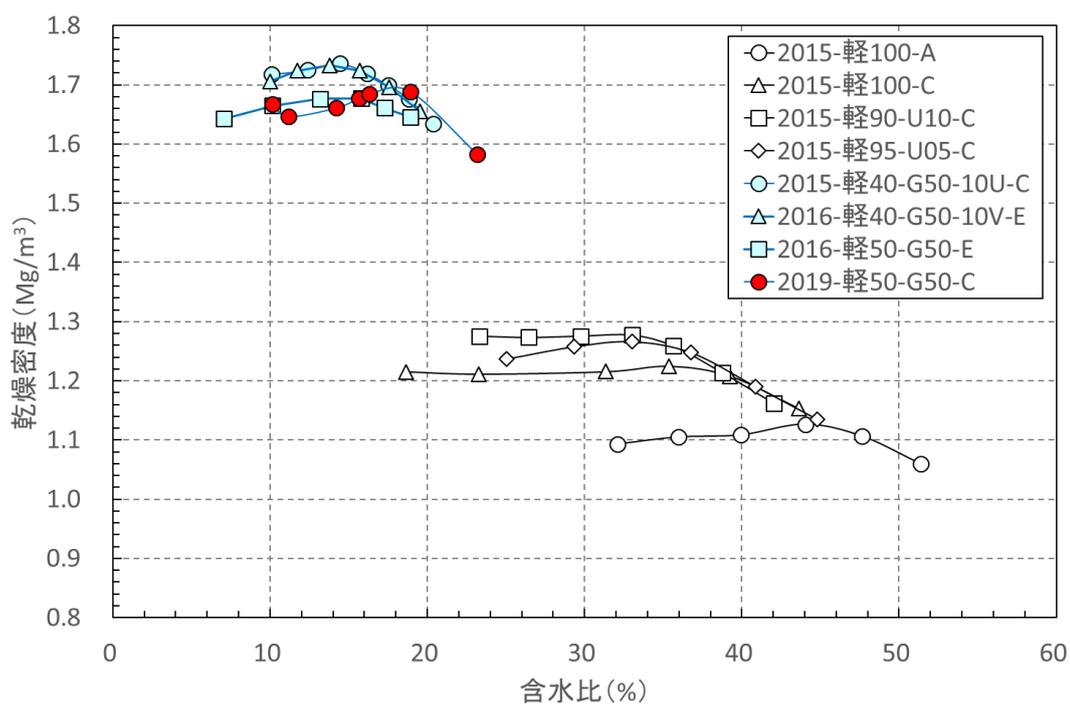


図 5.2-165 軽石凝灰岩と碎石の混合材料の締固め試験結果の比較

表 5.2-26 軽石凝灰岩混合土の試験条件

凡例	試験 実施年	配合 (乾燥質量比、%)				試験 法
		軽石 凝灰岩	石灰岩 碎石	ベントナイト		
2015-軽 100-A	2015	100	0	—	0	A 法
2015-軽 100-C	2015	100	0	—	0	C 法
2015-軽 90-10U-C	2015	90	0	クニゲル U	10	C 法
2015-軽 95-05U-C	2015	95	0	クニゲル U	5	C 法
2015-軽 40-G50-10U-C	2015	40	50	クニゲル U	10	C 法
2016-軽 40-G50-10V-E	2016	40	50	クニゲル V1	10	E 法
2016-軽 50-G50-E	2016	50	50	—	0	E 法
2019-軽 50-G50-C	2019	50	50	—	0	C 法

2015 年度の配合では透水試験が実施されているが、2016 年度の配合では透水試験が実施されていない。すなわち、軽石凝灰岩と碎石の混合土の透水試験結果は無い。そこ

で、今年度の締固め試験結果（軽石凝灰岩：石灰岩碎石=50%：50%）に基づき、透水試験を実施した。透水試験の仕様は、図 5.2-166 および表 5.2-27 に示す通りである。

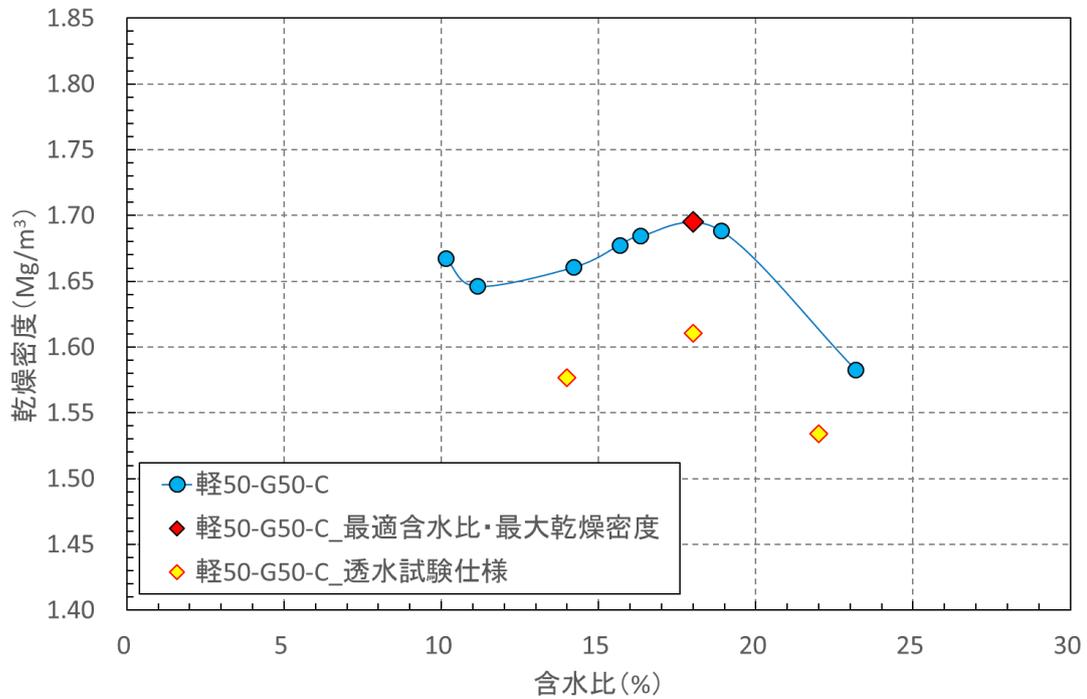


図 5.2-166 軽石凝灰岩と碎石の混合材料（軽石凝灰岩（2015 年度採取）：石灰岩碎石 2005 = 50 : 50）の透水試験仕様

表 5.2-27 軽石凝灰岩混合土の透水試験条件

Case	配合		仕様			
	軽石凝灰岩	石灰岩碎石 (2005)	含水比		乾燥密度	
			設定	値	設定 C 値	値
Case-1-1	50	50	$\omega_{opt}-4\%$	14.0	95%	1.577
Case-1-2	50	50	ω_{opt}	18.0	95%	1.610
Case-1-3	50	50	$\omega_{opt}+4\%$	22.0	95%	1.534

透水試験結果を図 5.2-167 に示す。含水比の上昇に伴い、透水係数が小さくなっていることが分かる。図 5.2-168 には、2015 年度に実施した透水試験結果と今年度を実施した透水試験結果を示す。ベントナイトを 10%混合した場合は、透水係数は小さくな

るが、ベントナイトを混合していない場合は、碎石の混合により乾燥密度は上昇するが、透水係数には大きな差はない。 $10^{-7} \sim 10^{-8} \text{m/s}$ 程度の値である。

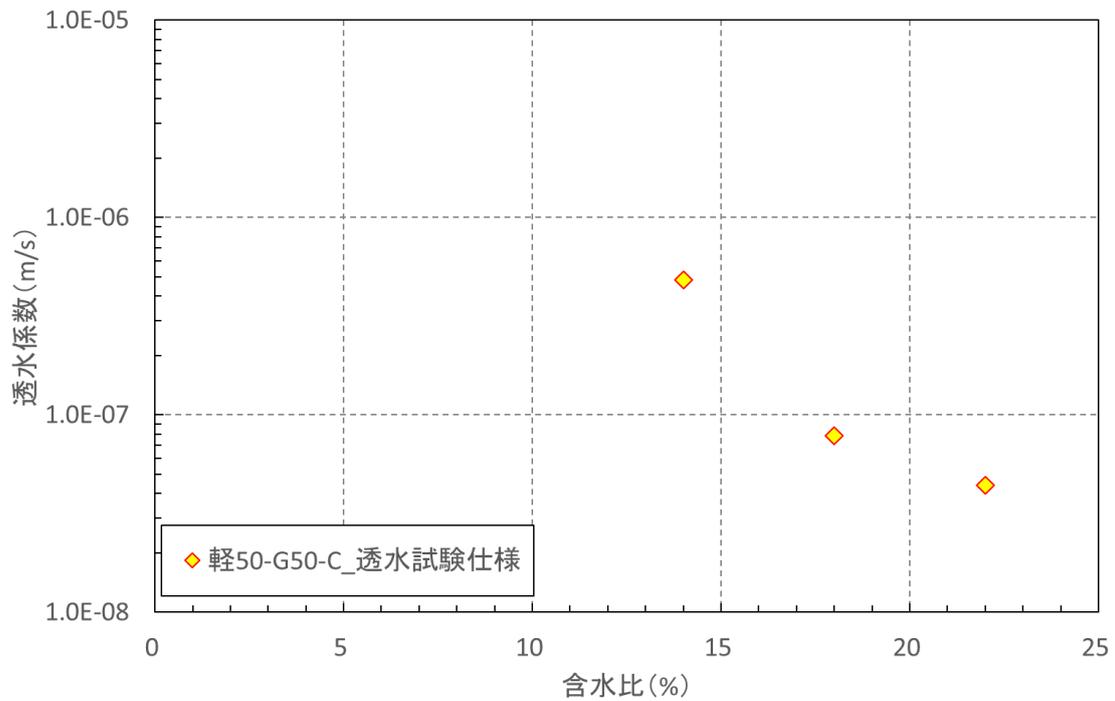


図 5.2-167 軽石凝灰岩と碎石の混合材料（軽石凝灰岩（2015 年度採取）：石灰岩碎石 2005 = 50 : 50）の透水試験結果

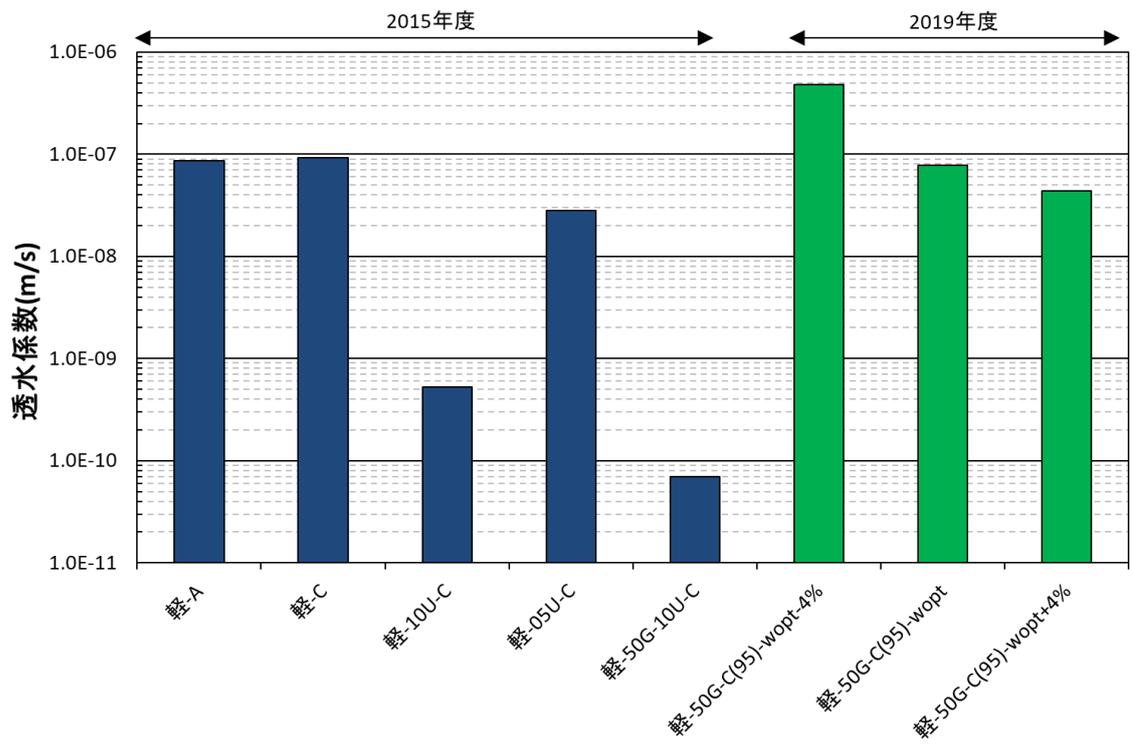


図 5.2-168 軽石凝灰岩と碎石の混合材料の透水試験結果の比較

③ 上部覆土の仕様設定

上部覆土の要求性能としては、周辺地盤と同等の透水係数 ($1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/s}$) とすることが設定されている。前述したように、軽石凝灰岩と碎石を乾燥質量比で 50% : 50% で混合した材料の透水係数は 10^{-8}m/s のオーダーとなっており、周辺地盤よりも低い透水係数となっている。上部覆土が周辺地盤よりも低い透水係数となった場合、鷹架層の流量が増加する、すなわち、埋設設備に流入する流量が増加することになる。また、液状化防止のために締固め度 90% 以上とする必要がある。この透水特性と液状化防止を考慮した上部覆土仕様を検討する。

上部覆土に用いる軽石凝灰岩は、細粒分 (粒径 $75 \mu\text{m}$) が多く含まれるため、軽石凝灰岩単体でも透水係数は 10^{-8}m/s オーダーと低い透水性を示す。また、軽石が含まれるため、単位体積重量が 1.3Mg/m^3 と軽く、拘束圧および液状化強度増加の目的で碎石を 50% 混合している。そのため、周辺地盤 (第四紀層) と同等の透水係数とするためには、低透水性に影響する細粒分含有率を低減する必要がある。

細粒分含有率の低減方法は、以下の方法が考えられる。

- ・ 軽石凝灰岩を分級し、細粒分含有率を制御する。
- ・ 混合土 (軽石凝灰岩、碎石) のうち、軽石凝灰岩の混合割合を低減することで細粒分含有率を制御する。

上記のうち、碎石の混合率が増加すると混合土が不均質になることから、品質管理が困難となる。よって、軽石凝灰岩の一部を砕砂 (荒目) に置き換えることで、細粒分含有率を制御する。

透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ とするために、既実施の試験結果を参考に、細粒分含有率 = 粘土分の上限值を算定する。

図 5.2-169 より目標透水係数 $1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/s}$ となる有効粘土密度 ρ_b は最大 0.4Mg/m^3 となる。数式 5.2-2 に有効粘土密度 ρ_b の計算式を示す。また、図 5.2-170 よりおおよその乾燥密度は 1.8Mg/m^3 となる。土粒子密度: $\rho_s = 2.7 \text{Mg/m}^3$ (一般値) とする。これらより、目標透水係数となる粘土混合率 ($100 - R_s$) を算定する。数式 5.2-2 を数式 5.2-3 のように変形し、数式 5.2-4 に示すように $\rho_d = 1.8$ 、 $\rho_b = 0.4$ 、 $\rho_s = 2.7$ を代入すると、細粒分含有率は、 $100 - 0.91 \times 100 = 9\%$ 程度となる。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}}$$

数式 5.2-2

ここに、

ρ_d : 乾燥密度 (Mg/m³)

R_s : 骨材混合率(%)

ρ_s : 土粒子密度 (Mg/m³)

$$\rho_b \left(100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s} \right) = \rho_d(100 - R_s)$$

$$\rho_b \cdot 100 - \rho_b \cdot \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s} = \rho_d \cdot 100 - \rho_d \cdot R_s$$

$$\rho_d \cdot R_s - \rho_b \cdot \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s} = \rho_d \cdot 100 - \rho_b \cdot 100$$

数式 5.2-3

$$\rho_d \cdot R_s \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) = 100(\rho_d - \rho_b)$$

$$R_s/100 = \frac{(\rho_d - \rho_b)}{\rho_d \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right)}$$

$$R_s/100 = \frac{(1.8 - 0.4)}{1.8 \left(1 - \frac{0.4}{2.7} \right)} = 0.91$$

数式 5.2-4

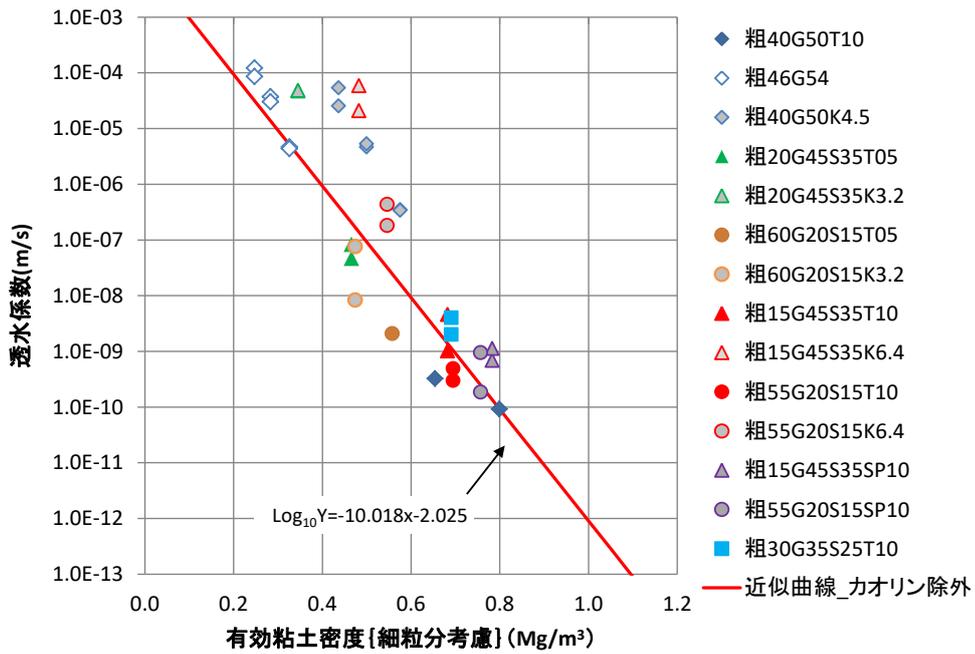


図 5.2-169 細粒分を対象とした有効粘土密度と透水係数の関係

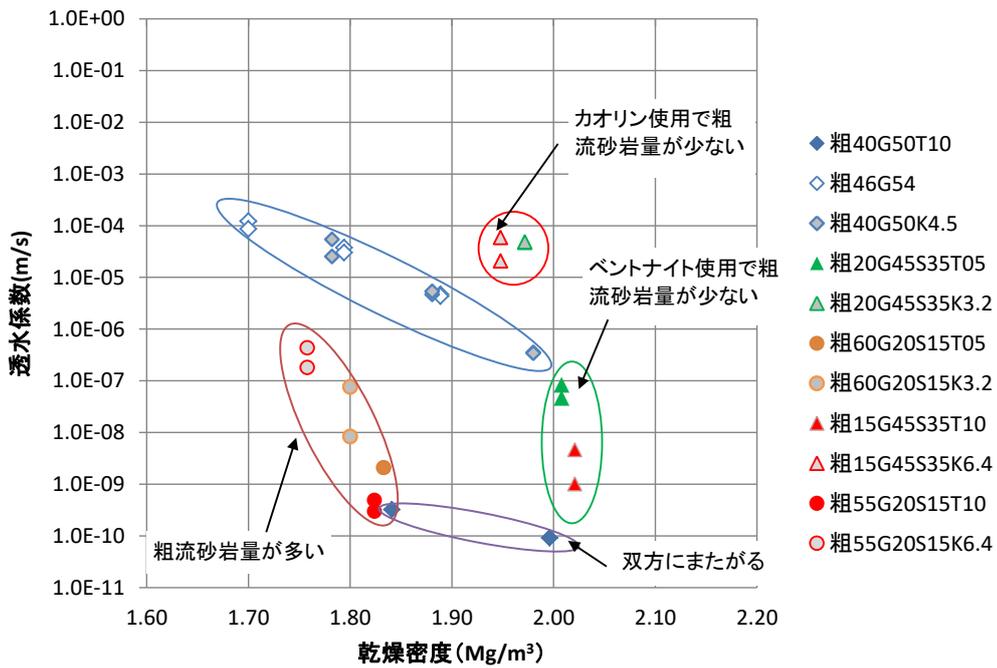


図 5.2-170 乾燥密度と透水係数の関係

軽石凝灰岩の粒度分布は図 5.2-161 に示す通りである。これより、細粒分含有率 (75 μ m) は 20%~40%程度となっている。現在試験対象の軽石凝灰岩：2015 年度の細粒分含有率は約 20%であるが、上記を踏まえ、数式 5.2-4 で求めたように、細粒分含

有率が9%程度以下になるように、軽石凝灰岩の混合割合を25%以下（1/4以下。40%
 $\div 4 = 10\%$ ）とする。

軽石凝灰岩(単体)を転圧した時の乾燥密度は約 1.0Mg/m^3 とかなり小さい値である。
 このため、質量率で混合すると細粒分が多く混合される可能性があるため、体積率で評
 価する。図 5.2-171 に上部覆土（混合土）の粒度分布を示す。図 5.2-171 より、体積率
 と質量率ではあまり変化しない結果となっている。これは、軽石凝灰岩の土粒子密度
 2.365Mg/m^3 、石灰岩の碎石、碎砂の土粒子密度 2.797Mg/m^3 、と大きくは変わらないこと
 による。

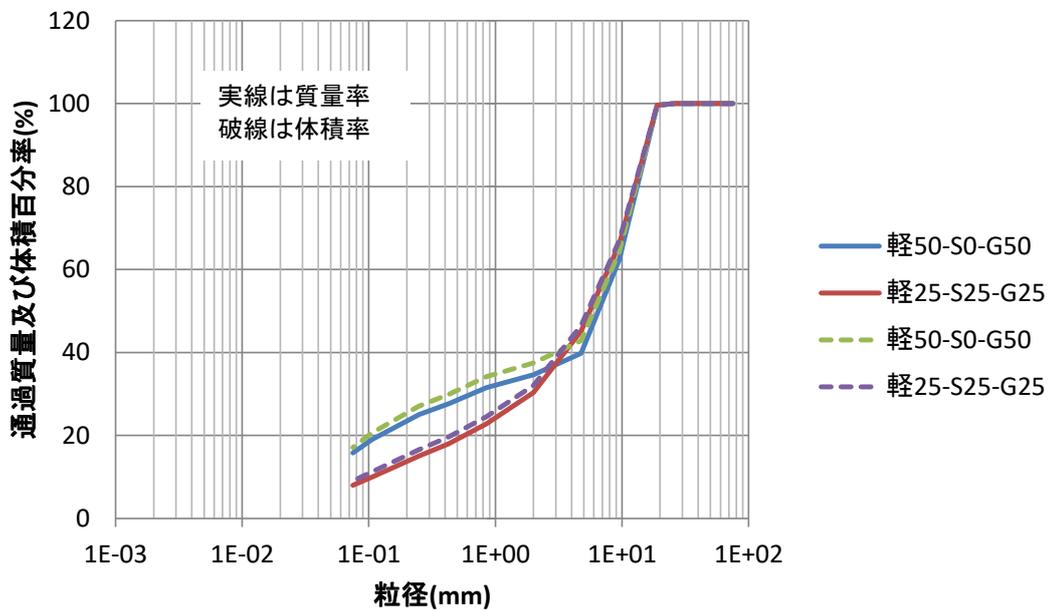


図 5.2-171 上部覆土（混合土）の粒度分布

上部覆土の仕様案を表 5.2-28 に示す。Case 1 は前述した。ここは、Case 2～Case 4
 について検討する。Case 2 は、軽石凝灰岩の細粒分をある程度除去し、その材料と碎石
 を混合するケースである。実工事においては、軽凝灰岩を分級して使用することを想定
 している。Case 3 は軽石凝灰岩を分級することなく使用するが、混合割合を乾燥質量比
 で25%としている。Case 4 はCase 3 に対して、碎石75%のうち25%分に関して碎砂
 を使用した場合である。これらのケースについて、Case 1 に対して透水性がどの程度、
 変わるのかを確認する。なお、Case 1 のケースに関しては、図 5.2-166 に示すように締
 固め試験を実施したが、試験に使用できる軽石凝灰岩の残量が少ないため、Case 2～

Case4 に関しては、各ケース 3 点程度の締固め試験を実施する。なお、実施に際しては、表 5.2-25 に示すように軽石凝灰岩掘削土（2009 年度、2010 年度、2012 年度）の含水比が高い（平均で 45%程度）ことを踏まえて、この含水比（50%混合の場合で 22%程度、25%混合で 12%程度）より高い混合土の含水比で突固め試験を行うこととする。突固め試験は A 法、C 法で実施する。

表 5.2-28 上部覆土の仕様案

Case No.	ケース名	混合率 (wt%)			備考
		軽石凝灰岩	碎石	砕砂	
Case 1	軽 50-G50	50	50	—	
Case 2	軽 50A-G50	50 ^{※1}	50	—	
Case 3	軽 25-G75	25	75	—	
Case 4	軽 25-G50-S25	25	50	25	

※1) 細粒分 (75・ μ m 以下) を除去した材料

④ 土粒子密度

試験に使用した各材料の土粒子密度の測定結果は、表 5.2-29 に示す通りである。軽石凝灰岩については、2015 年度に測定された値を用いることとする。

表 5.2-29 各材料の土粒子密度

材料	土粒子密度 (Mg/m ³)	備考
軽石凝灰岩	2.439	2015 年度測定値
石灰岩	2.717	

⑤ 初期含水比

試験に使用した各材料の初期含水比の測定結果は、表 5.2-30 に示す通りである。軽石凝灰岩については、2015 年度に測定された値を用いることとする。

表 5.2-30 各材料の初期含水比

材料	含水比 (%)	備考
軽石凝灰岩	35.9	2015 年度測定値
砕石 (石灰岩)	0.1	某所で保管されていたもの
砕砂 (石灰岩)	0.9	

⑥ 粒度

試験に使用した各材料の粒度試験結果を表 5.2-31 に、粒度分布を図 5.2-172 に示す。採取した軽石凝灰岩の細粒分は 20%程度であったが、分級することにより半分程度まで低減している。また、砕砂の細粒分は 2.3%であった。

表 5.2-31 各材料の粒度試験結果

測定値	単位	軽石凝灰岩	軽石凝灰岩 (細粒分※を除去) ※75 μ m 以下	砕石 2005 (石灰岩)	砕砂 (石灰岩)
最大粒径	mm	9.5	9.5	26.5	4.8
細粒分含有率	%	19.3	8.8	0.5	2.3
60%粒径 D_{60}	mm	0.49	0.70	13.0	1.04
50%粒径 D_{50}	mm	0.27	0.35	11.8	0.80
30%粒径 D_{30}	mm	0.126	0.164	9.65	0.511
10%粒径 D_{10}	mm	—	0.079	5.98	0.264
均等係数 U_c	-	—	8.9	2.2	3.9
曲率係数 U'_c	-	—	0.48	1.20	0.95

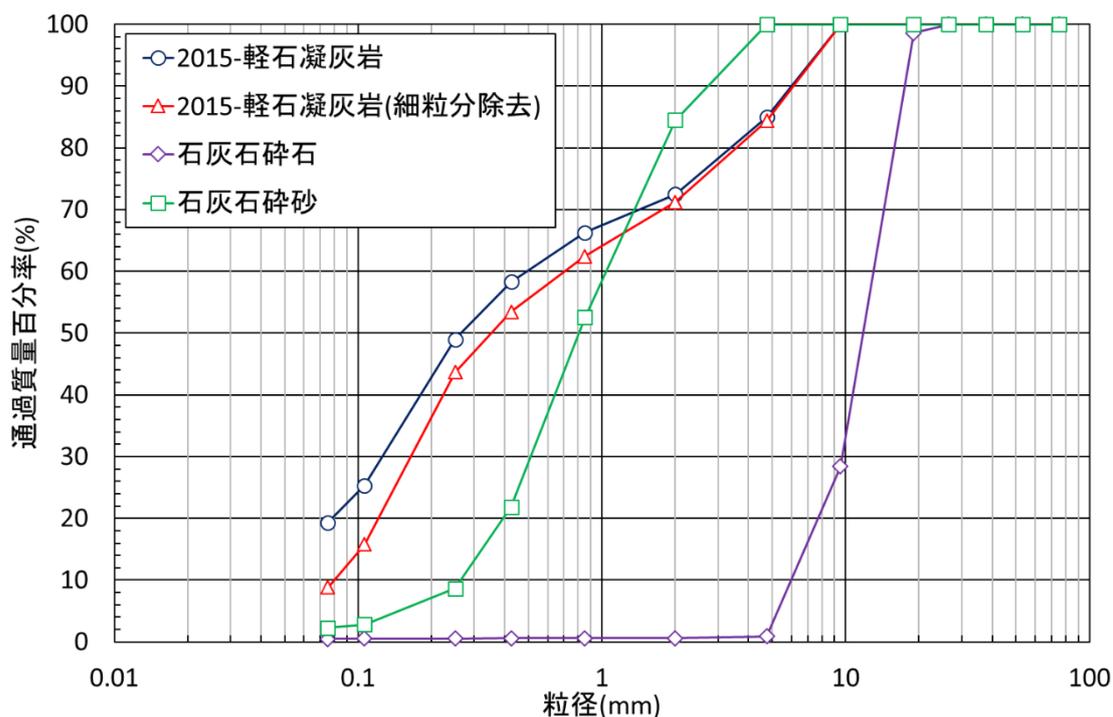


図 5.2-172 試験に使用した材料の粒度分布

⑦ 締固め曲線

表 5.2-28 に示す各ケースの締固め試験結果を図 5.2-173～図 5.2-176 に示す。図 5.2-173 は Case 1 (軽石凝灰岩 50%、石灰岩碎石 50%)、図 5.2-174 は Case 2 (細粒分を分級した軽石凝灰岩 50%、石灰岩碎石 50%)、図 5.2-175 は Case 3 (軽石凝灰岩 25%、石灰岩碎石 75%)、図 5.2-176 は Case 4 (軽石凝灰岩 25%、石灰岩碎石 50%、石灰岩碎砂 25%) の結果である。試験に使用できる軽石凝灰岩の量が少ないため、C 法については最大乾燥密度が得られる点数を実施したが、A 法に関しては、軽石凝灰岩の初期含水比が 45%程度、石灰岩の碎石・碎砂の初期含水比が 1%程度であると想定した際に、各配合での混合土を加水せずに混合した場合の含水比 (各図の紫線の含水比) での突固めとそれ以外の含水比での突固めの 2 点のみの締固め試験を実施した。A 法の場合は、それほど明瞭な締固め曲線でのピークは発現しないであろうという想定と、C 法で得られる最適含水比に混合土の含水比を調整するためには、母材である軽石凝灰岩を乾燥させる必要があると想定されるが、実工事において母材の初期含水比を下げる、すなわち乾燥させることは現実的ではないであろうとの想定から、この 2 点でのみ A 法での締固め試験を実施した。各ケースの締固め曲線を比較した結果を図 5.2-177 に、C 法の締

固め試験で得られた各配合での最大乾燥密度および最適含水比は表 5.2-32 に示す通りである。軽石凝灰岩の混合率が 50%の時の 25%の時で締固め曲線に差がみられるが、軽石凝灰岩の細粒分を分級した場合としない場合での差や、碎石だけの場合と碎石・砕砂の場合との差はそれほど大きくはなかった。

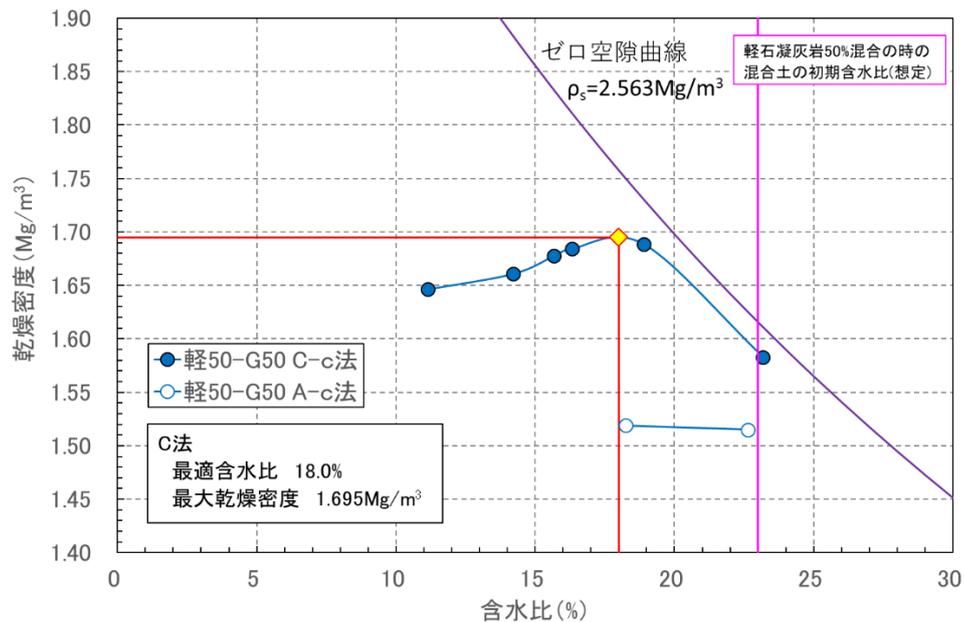


図 5.2-173 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果 (Case1 ; 軽 50-G50)

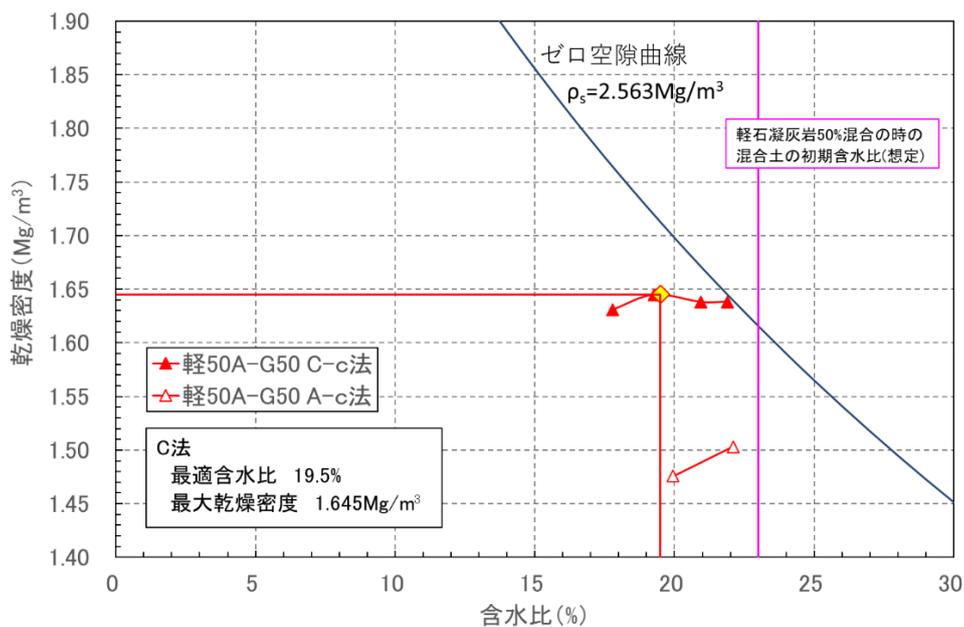


図 5.2-174 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果 (Case2 ; 軽 50A-G50)

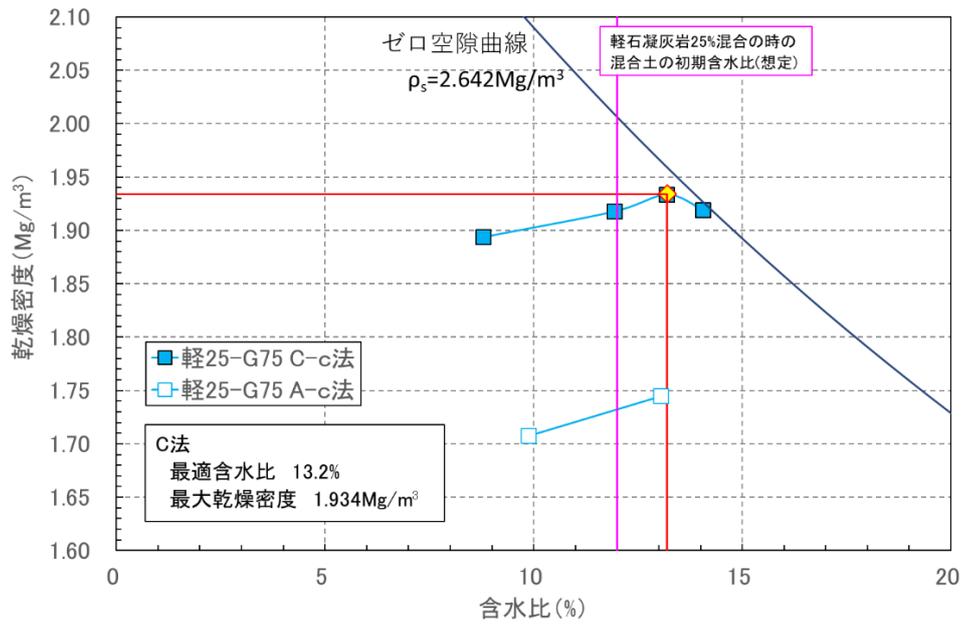


図 5.2-175 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果 (Case3; 軽 25-G75)

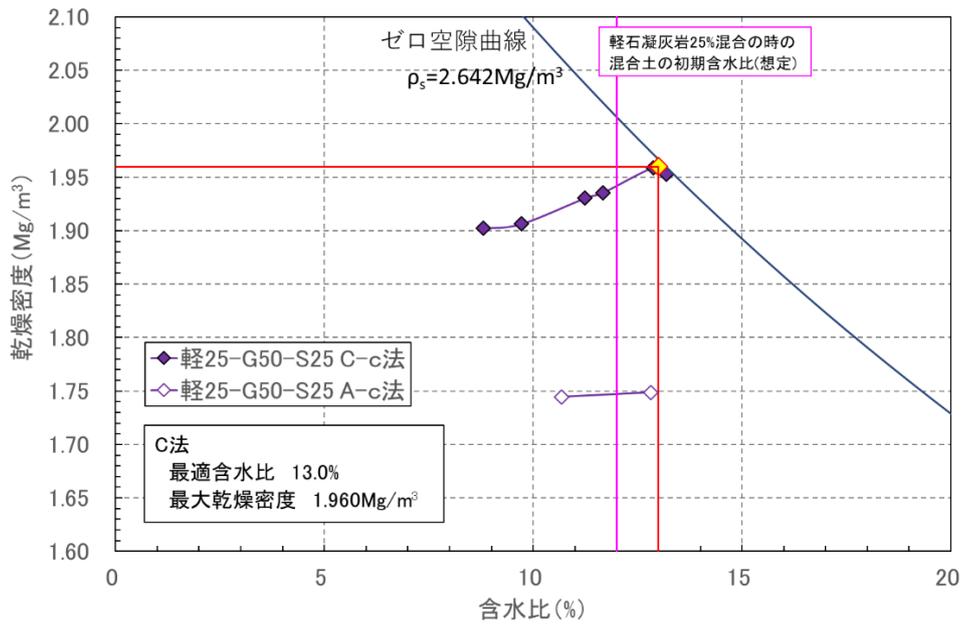


図 5.2-176 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果 (Case4; 軽 25-G50-S25)

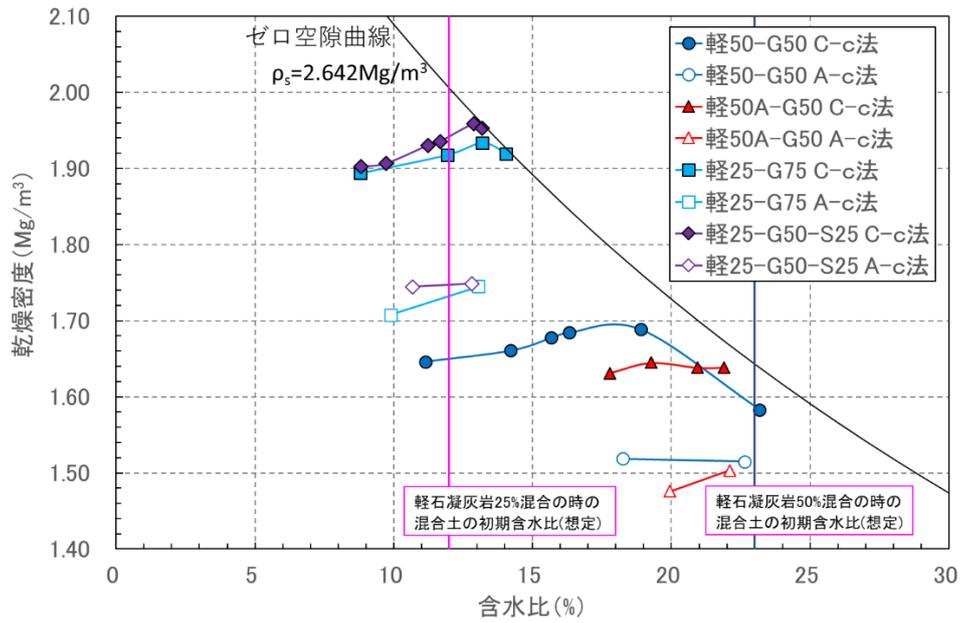


図 5.2-177 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果の比較

表 5.2-32 軽石凝灰岩混合土の締固め試験結果

Case No.	Case 名	母岩		石灰岩			締固め試験結果	
		種類	混合率	種類	混合率		最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m³)
					碎石	砕砂		
Case1	軽 50-G50	軽石凝灰岩	50	石灰岩	50	0	18.0	1.695
Case2	軽 50A-G50	軽石凝灰岩 A	50	石灰岩	50	0	19.5	1.645
Case3	軽 25-G75	軽石凝灰岩	25	石灰岩	75	0	13.2	1.934
Case4	軽 25-G50-S25	軽石凝灰岩	25	石灰岩	50	25	13.0	1.960

⑧ 透水試験

各配合の材料の透水試験の仕様案を表 5.2-33 に示す。初期含水比は、想定した混合土の初期含水比とし、乾燥密度は Case1 および Case2 は $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 、Case3 および Case4 は $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ とした。透水試験の仕様案を、締固め曲線と比較した結果を、図 5.2-178～図 5.2-181 に示す。A 法ベースでの密度設定となるが、C 法に基づく締固め規定値でも表 5.2-33 に示すように 92～95%程度になる。なお、Case1 に関しては、既実施のケースに近い条件であるため、Case2～Case4 のケースのみを実施することとした。

透水試験結果を図 5.2-182 に示す。軽石凝灰岩の細粒分を除去したケースは除去しない場合とそれほど差は無かったが、軽石凝灰岩の混合率を 25%とすると透水係数は大きくなった。軽石凝灰岩の混合率が 50%の時より 1 オーダー程度大きくなっており、碎石だけの混合の場合と碎石・砕砂を混合した場合は、碎石・砕砂を混合した方が透水係数は小さくなった。

表 5.2-33 軽石凝灰岩混合土の透水試験仕様

Case No.	Case 名	供試体仕様		C 値 (C 法)	透水係数 (m/s)
		初期含水比 (%)	乾燥密度 (Mg/m^3)		
既実施	軽 50-G50	14.0	1.577	95.0	4.81×10^{-7}
既実施	軽 50-G50	18.0	1.610	95.0	7.81×10^{-8}
既実施	軽 50-G50	22.0	1.534	95.0	4.40×10^{-8}
Case1	軽 50-G50	23.0	1.500	94.4	実施せず
Case2	軽 50A-G50	23.0	1.500	93.8	1.78×10^{-7}
Case3	軽 25-G75	12.0	1.800	93.8	6.55×10^{-6}
Case4	軽 25-G50-S25	12.0	1.800	92.7	1.84×10^{-6}

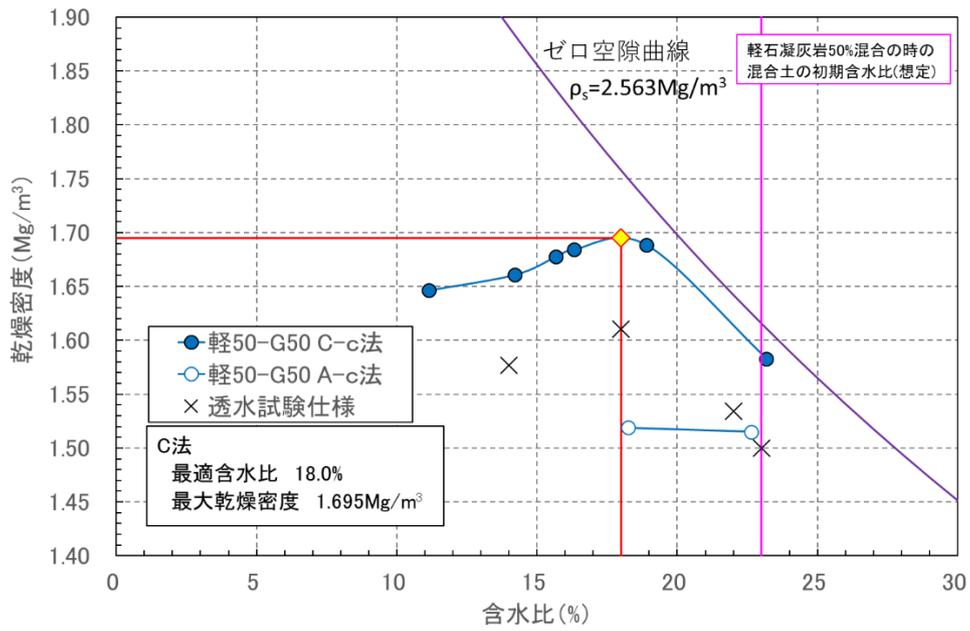


図 5.2-178 軽石凝灰岩混合土の透水試験仕様 (Case1；軽 50-G50)

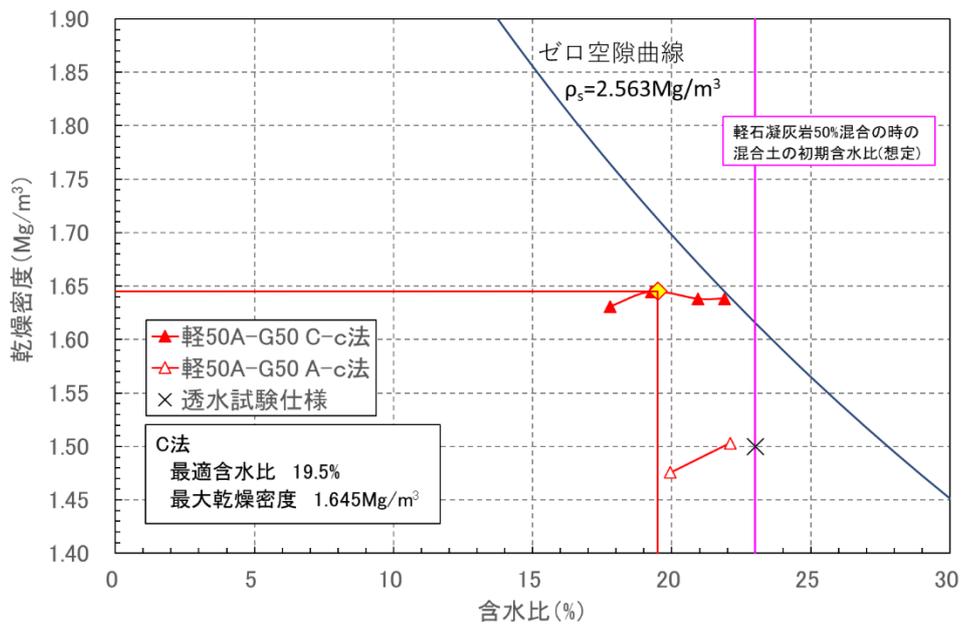


図 5.2-179 軽石凝灰岩混合土の透水試験仕様 (Case2；軽 50A-G50)

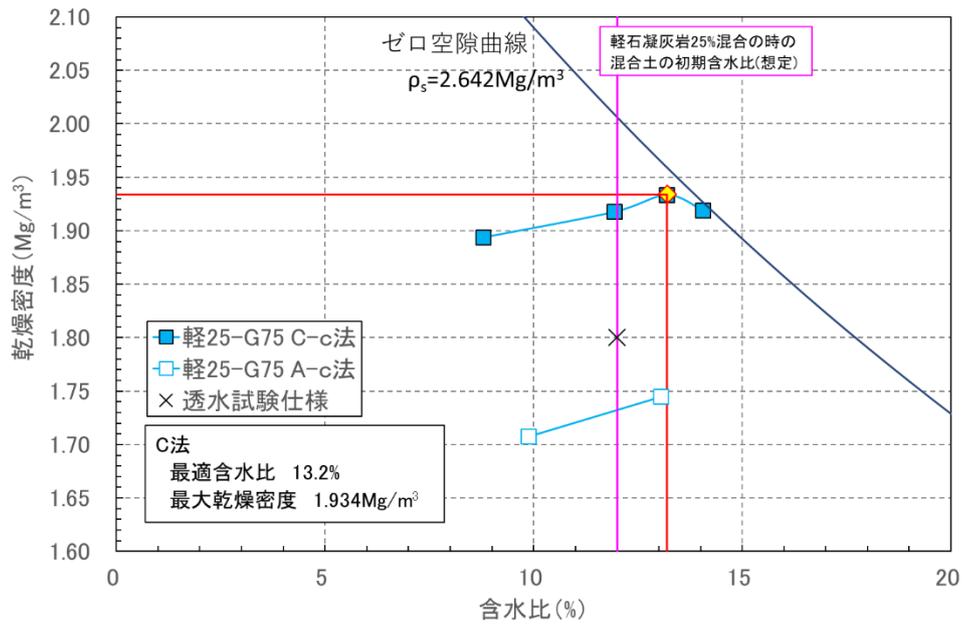


図 5.2-180 軽石凝灰岩混合土の透水試験仕様 (Case3 ; 軽 25-G75)

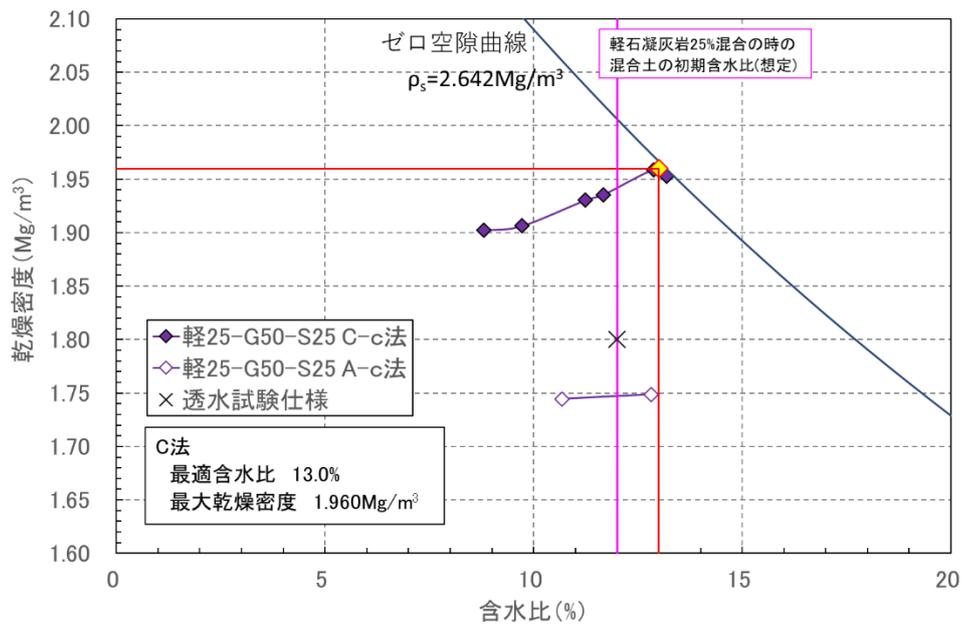


図 5.2-181 軽石凝灰岩混合土の透水試験仕様 (Case4 ; 軽 25-G50-S25)

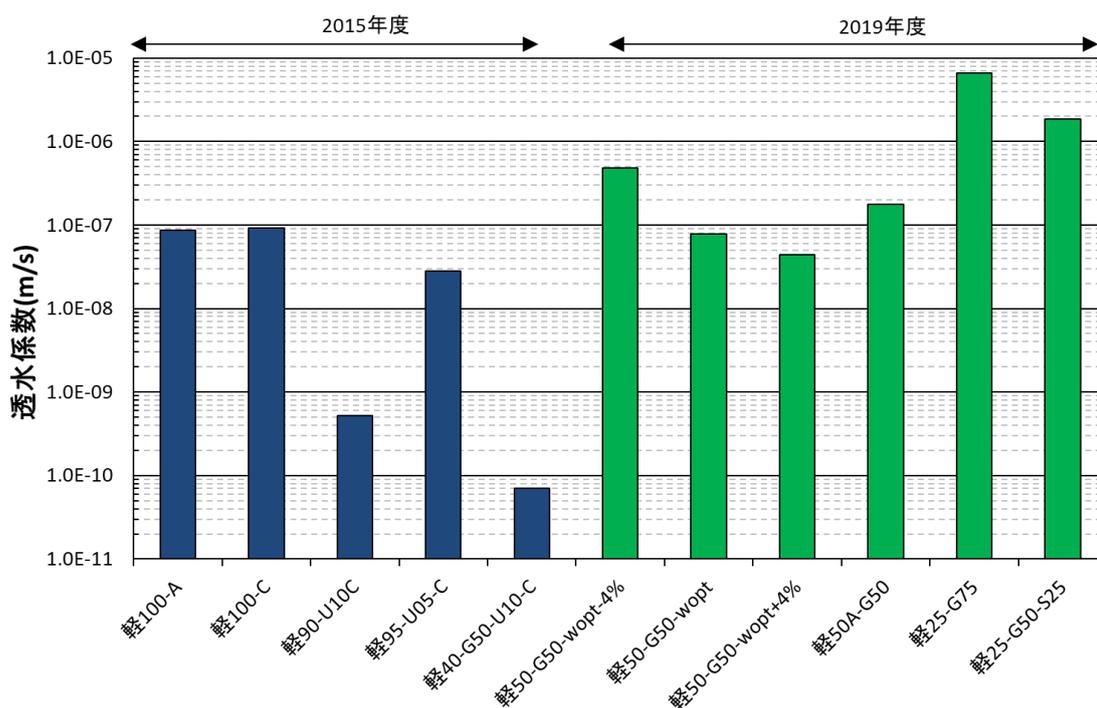


図 5.2-182 軽石凝灰岩混合土の透水試験結果

⑨ 三軸圧縮強度試験

上部覆土の材料を対象とした三軸圧縮試験の試験ケースを表 5.2-34 に示す。Case4 は供試体のサイズは礫分が混合されているので直径 100mm、高さ 200mm とした。

表 5.2-34 上部覆土の三軸圧縮強度試験ケース

Case	混合率 (%)			C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)		
	軽石凝灰岩	石灰岩					
		碎石	砕砂				
Case4	25	50	25	90	50	100	200

Case4 の軸差応力～軸ひずみ関係、モール・クーロンの応力円、主応力比～軸ひずみ関係、主応力経路、軸差応力～平均主応力関係をそれぞれ作成した。その結果を図 5.2-183～図 5.2-187 に示す。図 5.2-184 に示したモール・クーロンの応力円、図 5.2-186 に示した主応力経路、図 5.2-187 に示した軸差応力～平均主応力関係より有効応力を元にした粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' 、限界状態パラメータ M を求めた。その結果を

表 5.2-35 に示す。内部摩擦角 ϕ' はモール・クーロンの応力円で求めたものよりも主応力経路から求めたものの方が高めになった。図 5.2-186 に示した主応力経路より、供試体内部の応力状態は過圧密状態であることがわかる。そのため、モールの応力円は原点に近い方に寄せられており、粘着力 c はモールの応力円から求めた値の方が大きくなっている。

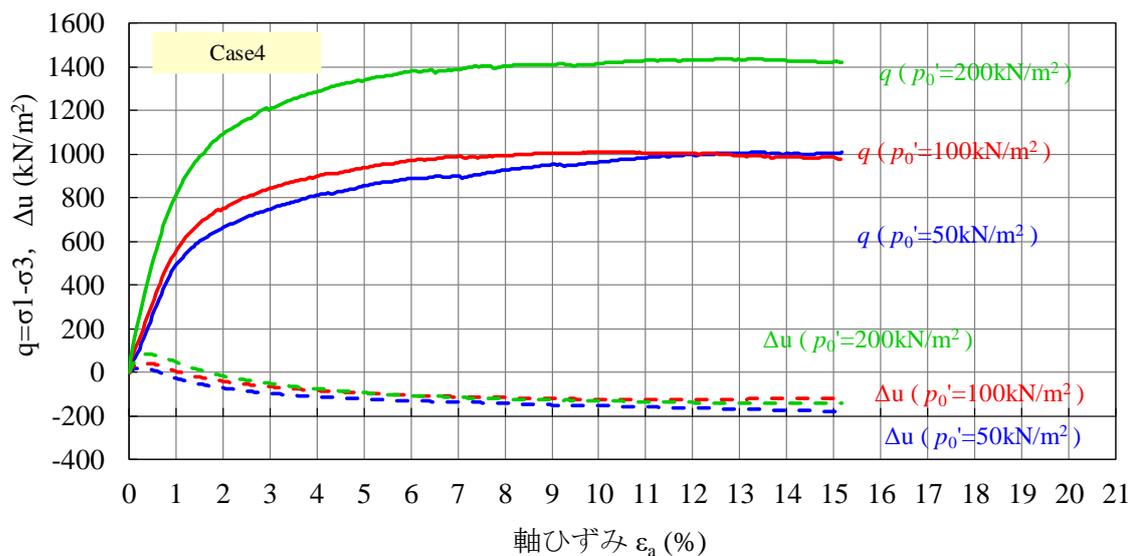


図 5.2-183 軸差応力～軸ひずみ関係 (Case4)

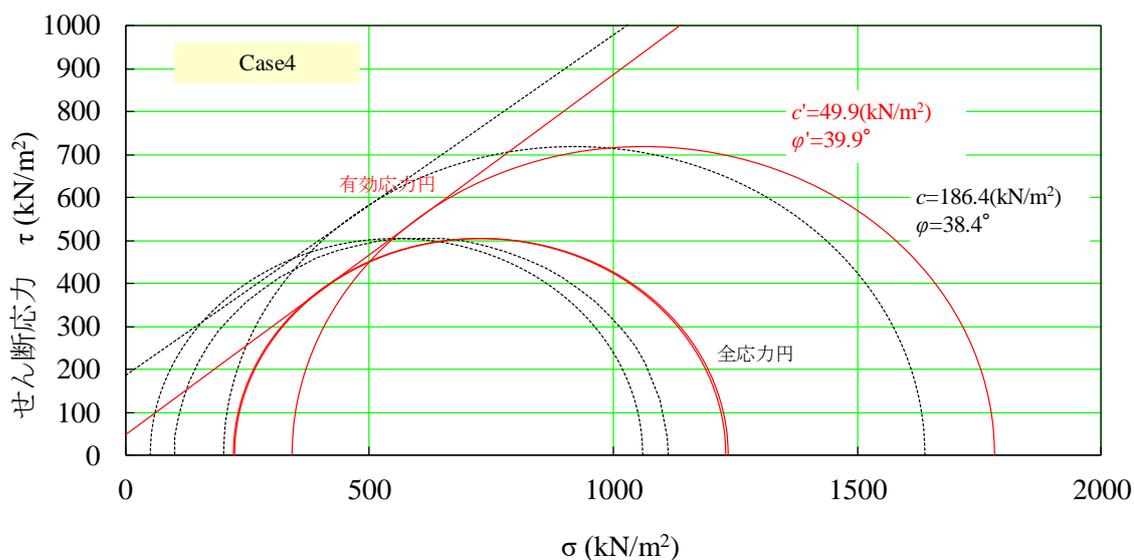


図 5.2-184 モール・クーロンの応力円 (Case4)

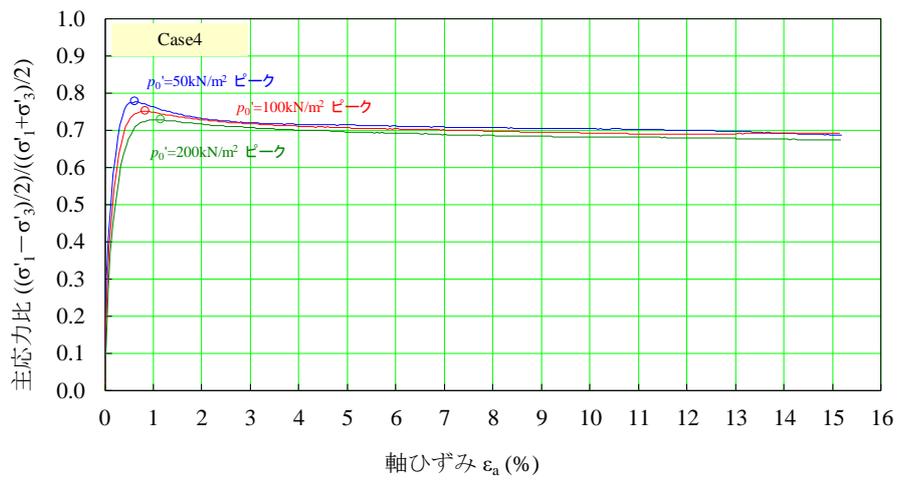


図 5.2-185 主応力比～軸ひずみ関係 (Case4)

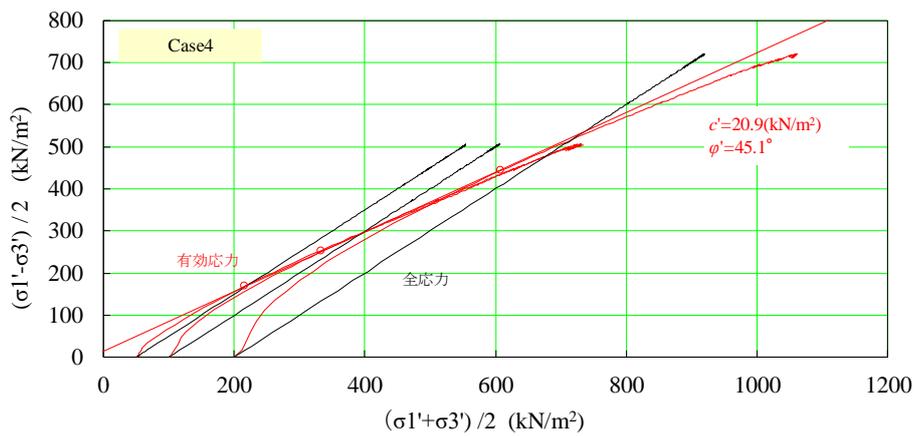


図 5.2-186 主応力経路 (Case4)

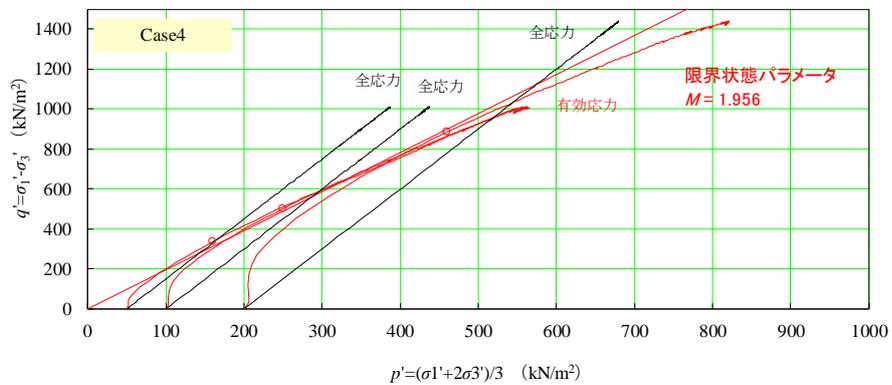


図 5.2-187 軸差応力～平均主応力関係 (Case4)

表 5.2-35 上部覆土の三軸圧縮強度試験結果

Case	混合率 (%)			モール応力円		主応力経路		限界状態 パラメータ
	軽石凝灰岩	石灰岩		c' (MPa)	ϕ' (deg)	c' (MPa)	ϕ' (deg)	
		碎石	砕砂					
Case4	25	50	25	49.9	39.9	20.9	45.1	1.956

⑩ 繰り返し三軸試験 (動的変形試験)

表 5.2-36 に上部覆土の繰り返し三軸試験(動的変形試験)の試験ケースを示す。Case4 の剛性の履歴減衰 (H-D モデル) を図 5.2-188 に示す。せん断ひずみの増加に伴い剛性の低下がみられる。各ケースとも、ひずみが 0.001%程度まで剛性が大きく低下することはなかったが、ひずみが小さいレベルから徐々に剛性が低下していくのを確認した。履歴減衰係数は 18.50%であった。

表 5.2-36 上部覆土の繰り返し三軸試験 (動的変形試験) ケース

Case	混合率 (%)			C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)	備考
	軽石凝灰岩	玄武岩				
		碎石	砕砂			
Case4	25	50	25	90	50	

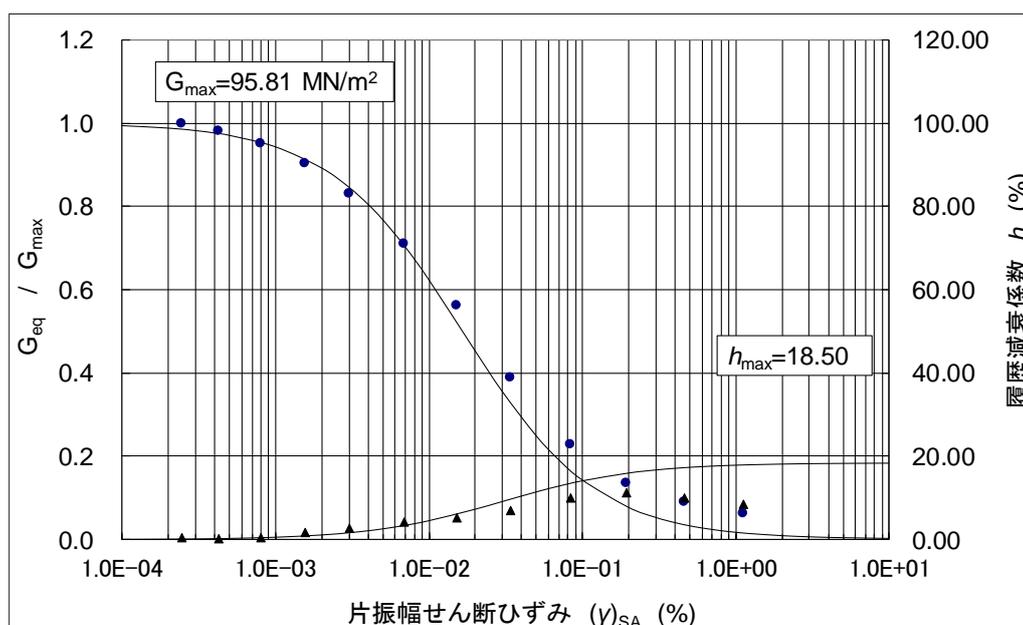


図 5.2-188 剛性の履歴減衰 (H-D モデル) (Case4)

⑪ 弾性波速度測定

表 5.2-37 に上部覆土の弾性波速度測定ケースの試験ケースを示す。Case4 は飽和後の供試体が自立困難であったため、50kPa で拘束した状態で測定を行った。図 5.2-189 に弾性波速度測定時の弾性波波形の経時変化を示す。Case4 に関しても、波形が変化する点の時間の読み取りは容易であった。

データ整理の結果を表 5.2-38 に示す。 V_p の平均値は 1787.0m/s であり、 V_s の平均値は 354.0m/s であった。

表 5.2-37 上部覆土の弾性波速度測定ケース

Case	混合率 (%)			C 値 (%)	有効拘束圧 (kPa)	備考
	軽石凝灰岩	石灰岩				
		碎石	砕砂			
Case4	25	50	25	90	50	

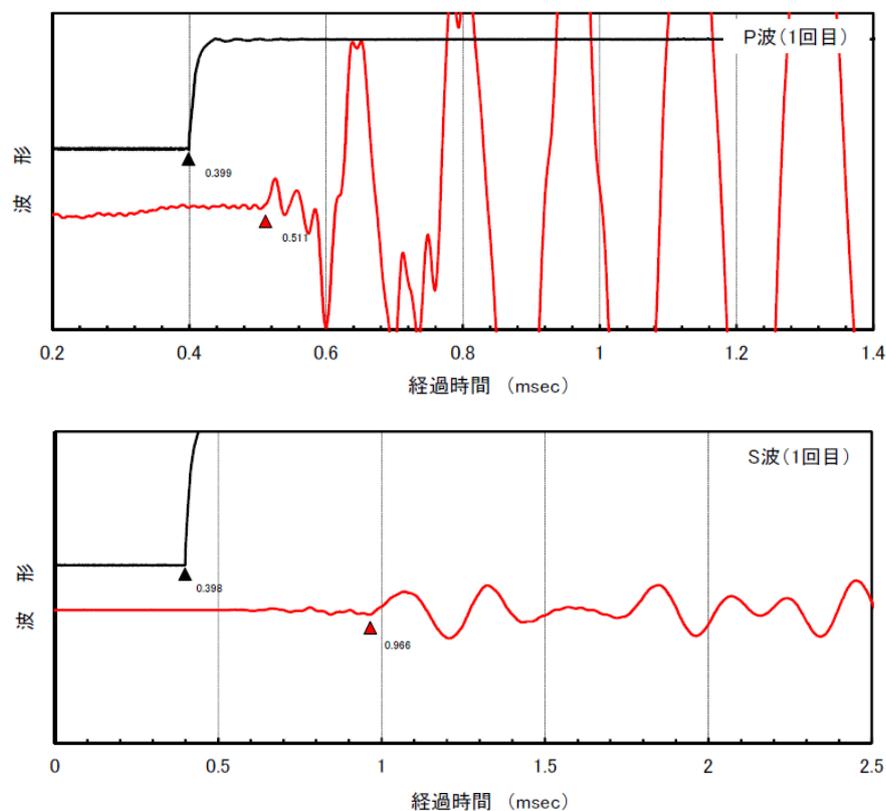


図 5.2-189 弾性波の強度と透過時間関係 (Case4、上:P波、下:S波)

表 5.2-38 上部覆土材料の弾性波速度測定データ整理結果

		Case4
Vp (m/s)	1 回目	1787.0
	2 回目	1787.0
	平均	1787.0
Vs (m/s)	1 回目	354.0
	2 回目	354.0
	平均	354.0
動ポアソン比		0.480
動弾性係数(kN/m ²)		750.2
動せん断弾性係数(kN/m ²)		253.5

5.4 まとめ

液状化判定に必要な強度特性ならびに透水性を確認するために覆土の室内試験を実施した。室内試験は、難透水性覆土、下部覆土、上部覆土を対象に実施した。難透水性覆土は、購入砂とベントナイトの混合土である。下部覆土は現地発生土である粗粒砂岩、上部覆土は現地発生土である軽石凝灰岩を主な材料とするものであり、下部覆土および上部覆土への適用に際しては、これら現地発生土に碎石、砕砂やベントナイトを混合した。

5.4.1 難透水性覆土

難透水性覆土に関する試験項目と試験数量を表 5.4-1 に示す。難透水性覆土に関しては、必要となる透水性を満足するために設定されたベントナイト混合率のベントナイト混合土を対象に透水性、強度特性等を取得した。使用するベントナイトは Ca 型ベントナイトである宮城県産のクニボンドと、Na 型ベントナイトである山形県産のクニゲル V1 の 2 種類とし、Na 型ベントナイトが Ca 型化した時を想定し、クニゲル V1 を強制 Ca 型化したベントナイトを用いた混合土に関する試験を実施した。実施した試験は、透水試験、膨潤圧試験、膨潤変形試験、圧密試験、弾性波速度測定、動的変形試験、液状化強度試験である。クニゲル V1 混合土に関しては、三軸圧縮強度試験（圧密非排水試験、 \overline{CU} 試験）を実施した。

5.4.2 下部覆土

下部覆土に関する試験項目と試験数量を表 5.4-2 に示す。下部覆土に関しては、現地発生土である粗粒砂岩を主な材料とする覆土であるが、低透水性を確保しつつ、液状化抵抗性を保つ必要があるため、低透水性を確保するためにベントナイトを混合し、液状化抵抗性を保つため碎石・砕砂を混合することとした。ベントナイトとしては青森県産の津軽 2 号を、碎石・砕砂としては、青森県産の玄武岩を用いた。また、長期に渡り低透水性を確保する必要があるため、ベントナイトが溶解、あるいはベントナイトのうちモンモリロナイトが溶解した時を想定した透水試験も実施した。なお、液状化抵抗性を保つために乾燥密度の増加を指向し、最適粒度曲線 Fuller 曲線式を用い、下部覆土の材料仕様を設定した。既報告によれば、一般の土については、 $n=0.5$ で間隙率は最小となったと報告されているので、Fuller 曲線の定数 n の範囲を 0.5 以下とし、単一の材料があまり突出しない（60% 以下）混合土の組み合わせを設定し（ $n=0.2, 0.3, 0.4$ ）、室内試験を実施した。実施した試験は、透水試験、三軸圧縮強度試験（圧密非排水試験、 \overline{CU} 試験）、弾性波速度測定、動的変

形試験、液状化強度試験である。試験の結果、今回の設定範囲内では Fuller 指数が最も大きい $n=0.4$ の時が、乾燥密度が最も大きくなり強度は高くなるが、透水性は Fuller 指数が小さい場合 ($n=0.2$) の方が小さくなり、液状化強度比も Fuller 指数が小さい場合 ($n=0.2$) の方が大きくなるという結果であった。

5.4.3 上部覆土

上部覆土に関する試験項目と試験数量を表 5.4-3 に示す。上部覆土の要求性能としては、周辺地盤と同等の透水係数 ($1.0 \times 10^{-4} \sim 10^{-6} \text{m/s}$) とすることが設定されている。上部覆土が周辺地盤よりも低い透水係数となった場合、鷹架層の流量が増加する、すなわち、埋設設備に流入する流量が増加することになる。また、液状化防止のために締固め度 90%以上とする必要がある。この透水特性と液状化抵抗性を考慮した上部覆土仕様を検討した。上部覆土の母材は現地発生土である軽石凝灰岩であるため、軽石凝灰岩を用いたこれまでの室内試験結果をまとめた上で、上述の仕様を満足する材料仕様（配合）について検討した。軽石凝灰岩に青森県産の石灰岩の碎石・砕砂を混合することとした。その結果、透水係数を 10^{-6}m/s 以上とするためには、軽石凝灰岩の混合率を 25%程度にする必要があることが分かった。軽石凝灰岩の混合率を 25%とし、碎石を 50%、砕砂を 25%混合した混合土に対して、強度特性（三軸圧縮強度試験（圧密非排水試験、CU試験）、弾性波速度測定、動的変形試験）の取得を行った。

表 5.4-1 難透水性覆土の試験実施項目

Case	ベントナイト		購入砂		締固め 試験	設定 密度 C 値	透水試験		強度試験						
	種類	混合率	種類	混合率			一 軸	三 軸	膨潤圧	膨潤 変形	圧密	弾性波 速度	動的 変形	液状化 強度	三軸 (CU)
Case-KB	クニボンド	30	三沢砂	70	1	97	2	—	2	2	1	1	1	1	—
Case-KV	クニゲル V1	20	三沢砂	80	1	95	2	3	10	2	1	1	1	1	1
Case-CaKV	Ca 型化 クニゲル V1	20	三沢砂	80	—	95	2	—	2	2	1	1	1	1	—
合計					2	—	6	3	14	6	3	3	3	3	1

表 5.4-2 下部覆土の試験実施項目

Step	Case	Fuller	母岩		ベントナイト		購入石				締固め試験	設定密度 C 値	透水試験			強度試験							
			種類	混合率	種類	混合率	種類	混合率		—			ベントナイト溶解	モンモリロナイト溶解	三軸圧縮強度試験(CU)			弾性波速度	動的変形	液状化強度			
								砕石	砕砂						100kPa	200kPa	400kPa						
1	CaseA	—	粗粒砂岩	43	津軽 2 号	7	石灰岩	50				100	—	2	2	—	—	—	—	—	—		
	CaseB	—	粗粒砂岩	43	津軽 2 号	7	石灰岩	50				95	—	2	2	—	—	—	—	—	—		
	CaseC	—	粗粒砂岩	43	津軽 2 号	7	石灰岩	50				90	—	2	2	—	—	—	—	—	—		
2	Case05-1	—	粗粒砂岩	45	津軽 2 号	5			玄武岩	40	10	1	95	—	—	—	1	1	1	—	—	—	
	Case05-2	—	粗粒砂岩	45	津軽 2 号	5			玄武岩	30	20	1	95	—	—	—	1	1	1	—	—	—	
	Case05-3	—	粗粒砂岩	45	津軽 2 号	5			玄武岩	15	35	1	95	—	—	—	1	1	1	—	—	—	
	Case05-4	n=0.4	粗粒砂岩	20	津軽 2 号	5			玄武岩	45	30	1	95	2	—	2	1	1	1	1	1	1	1
	Case05-5	n=0.3	粗粒砂岩	35	津軽 2 号	5			玄武岩	35	25	1	95	—	—	—	1	1	1	1	1	1	—
	Case05-6	n=0.2	粗粒砂岩	60	津軽 2 号	5			玄武岩	20	15	1	95	2	—	2	1	1	1	1	1	1	1
3	Case10-4	n=0.4	粗粒砂岩	15	津軽 2 号	10			玄武岩	45	30	1	95	2	—	2	1	1	1	1	1	1	1
	Case10-4'	n=0.4	粗粒砂岩	20	津軽 2 号	10			玄武岩	40	30	1	95	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Case10-5	n=0.3	粗粒砂岩	30	津軽 2 号	10			玄武岩	35	25	1	95	2	—	—	2	2	2	1	1	1	1
	Case10-6	n=0.2	粗粒砂岩	55	津軽 2 号	10			玄武岩	20	15	1	95	2	—	2	1	1	1	1	1	1	1
4	Case10-4a	n=0.4	粗粒砂岩	15	玄武岩石粉	10			玄武岩	45	30	1	95	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Case10-6a	n=0.2	粗粒砂岩	55	玄武岩石粉	10			玄武岩	20	15	1	95	2	—	—	1	1	1	—	—	—	—
合計											13	—	36			11	11	11	6	6	5		

表 5.4-3 上部覆土の実施試験項目

Case	母岩		購入石			締固め 試験	透水試験			強度試験					
	種類	混合率	種類	混合率			設定密度 C 値	初期 含水比	—	三軸圧縮強度試験(CU)			弾性波 速度	動的 変形	液状化 強度
				碎石	砕砂					50kPa	100kPa	200kPa			
Case-1-1	軽石凝灰岩	50	石灰岩	50		2	95	$\omega_{opt}-4\%$	1	—	—	—	—	—	—
Case-1-2	軽石凝灰岩	50	石灰岩	50			95	ω_{opt}	1	—	—	—	—	—	—
Case-1-3	軽石凝灰岩	50	石灰岩	50			95	$\omega_{opt}+4\%$	1	—	—	—	—	—	—
Case-2	軽石凝灰岩 A	50	石灰岩	50		2	—	—	1	—	—	—	—	—	—
Case-3	軽石凝灰岩	25	石灰岩	75		2	—	—	1	—	—	—	—	—	—
Case-4	軽石凝灰岩	25	石灰岩	50	25	2	—	—	1	1	1	1	—	—	—
合計						8	—	—	6	1	1	1	0	0	0

※軽石凝灰岩 A：細粒分をなるべくカットした材料

第6章 覆土の施工性試験

6.1 概説

現地施工においても室内試験による設計仕様とおりの覆土を製造および施工でき、目標の透水係数を達成できる見込みがあることを確認する。

6.2 現地施工試験の概要

覆土の施工実現性を確認するための現地施工試験を実施した。試験結果を整理し、室内試験と同等の性能を確保できることを確認する。施工試験の実施に際しては、一般土工として広く適用されている道路土工要綱 [35]の他に、本施設と同様に透水性に留意している土構造物として河川堤防に着目した河川土工マニュアル [36]を参照し、覆土の設計要求性能である低透水性を満足するための締固め機械、締固め厚さ、締固め回数および含水比を確認する。

図 6.2-1 に難透水性覆土の試験施工フローを、図 6.2-2 に難透水性覆土の施工イメージ図を示す。また、表 6.2-1 に現地施工試験と一般土工（河川土工マニュアル [36]）の施工方法比較を示す。

河川土工マニュアル [36] からの改良点として、覆土を平坦かつ均質に施工するため、フィニッシャーを用いて撒出しおよび敷均しを行い、測定機器を用いて撒出し厚さ(10cm/層)を確認する。敷均し後、河川土工マニュアル [36]で一般的と示されている重機を用いて締固めを行い、1層目の覆土を設置する。品質確認のため、高さおよび密度をそれぞれ測定し、2層目以降を同様に実施する。

難透水性覆土(Ca型30%, 初期含水比= $w_{opt}+4\%$, 撒出し厚さ10cm/層)を対象とした現地施工試験の概要を表 6.2-2 に示す。表 6.2-2 の小型振動ローラはピット側部を、大型振動ローラはピット上部を想定している。

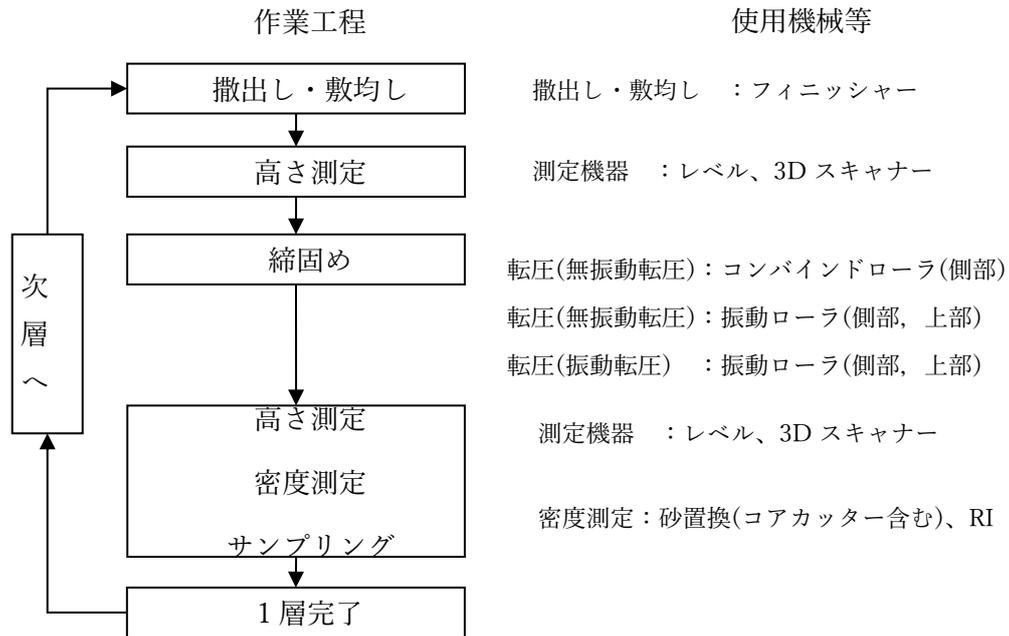


図 6.2-1 難透水性覆土の試験施工フロー

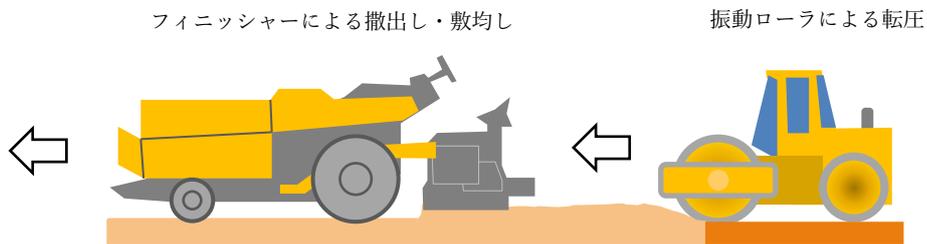


図 6.2-2 難透水性覆土の施工イメージ図

表 6.2-1 現地施工試験と一般土工（河川土工マニュアル [36]）の施工方法比較

比較項目	現地施工試験	一般土工（河川土工マニュアル [36]）
撒出し 敷均し	撒出し厚さ : 10cm 施工機械 : フィニッシャー	撒出し厚さ : 35cm~45cm 施工機械 : ブルドーザ 他
締固め	締固め回数 : 6回~8回 施工機械 : 振動ローラ	締固め回数 : 10回程度以下 施工機械 : 振動ローラ 他

表 6.2-2 現地施工試験一覧

No.	MBC* ¹ (mmol/100g)	透水係数(m/s)	締固め規定値 C'値(%)* ²	施工機械等
1	123	6.4×10^{-12} ~ 7.0×10^{-11} 【n=40】	95~100 (平均 97) 【n=200】	小型振動ローラ 1.5t 幅 2.0m×長さ 9m×10層 無振動転圧 2回、振動転圧 6回
2	123	4.4×10^{-12} ~ 9.7×10^{-12} 【n=8】	99~104 (平均 102) 【n=20】	大型振動ローラ 8.8t 幅 3.0m×長さ 6m×2層 無振動転圧 2回、振動転圧 8回

*1：メチレンブルー吸着量であり、モンモリロナイトの量を表す指標である。

*2：現地サンプリング試料の含水比における締固め曲線上の乾燥密度 ρ_{d1} に対する現地サンプリング試料の乾燥密度 ρ_{dm} の比率で表される規定値である(図 6.2-3 参照)。

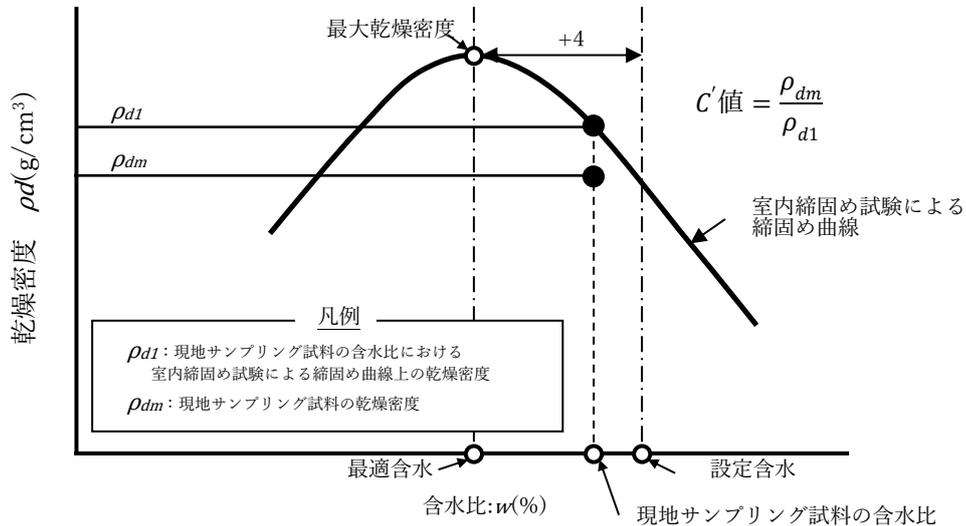


図 6.2-3 締固め規定値の概要

6.3 混合土の製造について

混合土の製造はバッチ式ミキサー(容量 2,250L、混練時間 5 分程度)で行った。ベントナイト混合土の仕様を表 6.3-1 に、主要材料を表 6.3-2 に示す。

ここで、室内成型供試体を用いて、ベントナイト(クニボンド相当)を使用したベントナイト混合土で構成される難透水性覆土を対象に、ベントナイト混合率および含水比をパラメータスタディした透水試験(地盤工学会基準 JGS 0313-2018)の結果を図 6.3-1 に示す。透水係数と含水比の関係において、その曲線の極小を生じる含水比は、一般に最適含水比よりわずかに高い含水比になることで知られており [3]、本試験結果においても同様の傾向を確認できる。よって、覆土において目的の透水係数を得るためには、ベントナイト混合率および含水比を管理する必要がある。

締固め施工後のサンプリングにより、ベントナイト混合率(ここでは代替指標として細粒分含有率)および含水比に対して、品質確認を行った。混合土の製造確認結果を図 6.3-2 および図 6.3-3 に示す。ベントナイト混合率は 30wt%±2%程度、含水比は $w_{opt}+4%\pm 2%$ の範囲であり、設計仕様の配合を確保した状態で混合できていることが分かる。

表 6.3-1 ベントナイト混合土の仕様

項目	仕様	備考
ベントナイト混合率	30%	—
含水比	$w_{opt}^{*1}+4%\pm 2%$	$w_{opt}+4%=19.6%$

*1：最適含水比

表 6.3-2 主要材料

項目	仕様
Ca 型ベントナイト(クニボンド RW)	MBC120 以上
コンクリート用細骨材	青森県三沢市砂森産

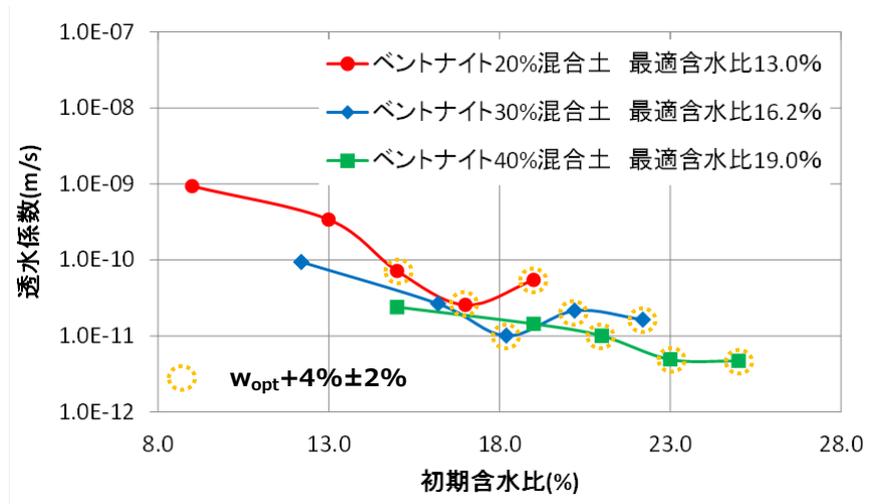


図 6.3-1 ベントナイト混合率ごとの含水比と透水性係数の関係

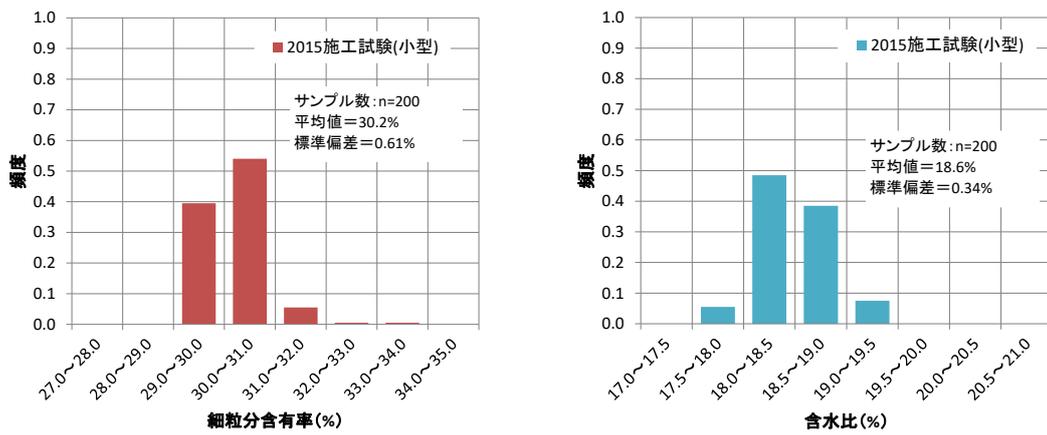


図 6.3-2 混合土の製造確認結果：小型施工機械分

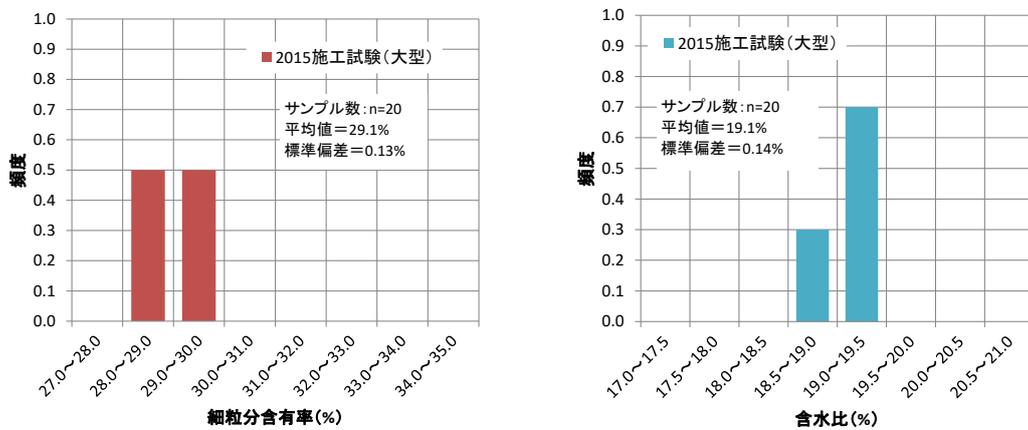


図 6.3-3 混合土の製造確認結果：大型施工機械分

6.4 現地施工試験の結果

有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係（試験結果）を図 6.4-1 に示す。透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を確保している。

以上のことから、現地施工においても室内試験による設計仕様とおりの覆土を製造および施工でき、目標の透水係数を達成できる見込みがあると考えられる。

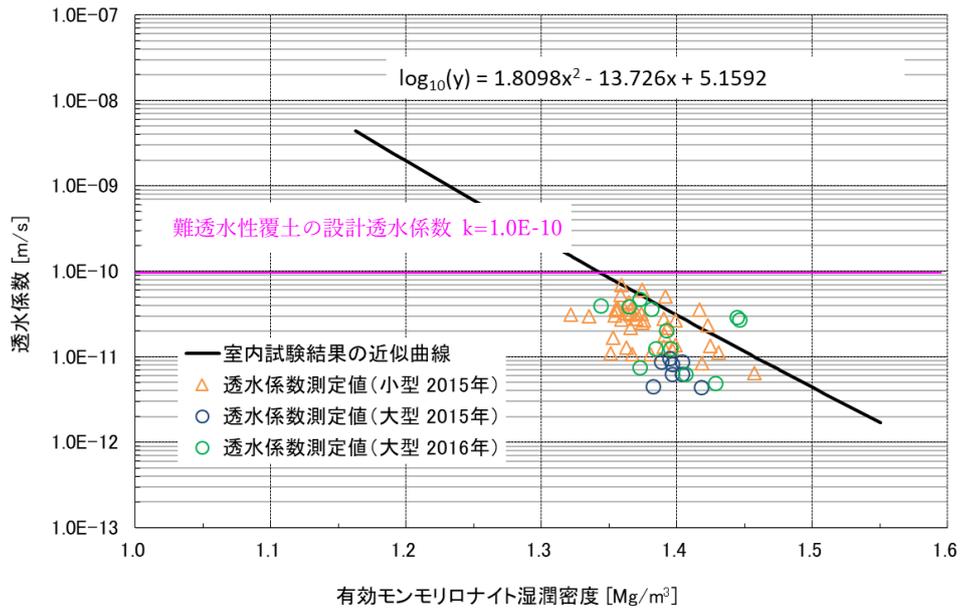


図 6.4-1 有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数の関係
(現地施工試験結果プロット、Ca 型ベントナイト混合土)

第7章 覆土の品質管理方法の検討

7.1 概説

設計要求は巨視的透水係数を満足することであり、覆土全体のばらつきを考慮した性能を管理する必要がある。具体的な方法は確立されておらず、ここに一案を整理する。

7.2 覆土施工時における品質管理（案）

表 7.2-1 に難透水性覆土の品質管理項目(案)を示す。品質管理は、「材料納入時」、「覆土材料製造時」、「覆土施工時」および「完了確認時」の各段階において、所定の管理項目を実施する。

なお、ここで示す品質管理(案)は現在の覆土仕様から想定しているものであり、設計透水係数および設計厚さを確保するための詳細な品質管理方法(管理項目、管理基準、管理方法および管理頻度)については、実際の覆土施工時に行う施工試験結果を用いて、平均値およびばらつき(分散)による巨視的な性能を考慮して最終決定する。その際、本書で示す考え方を基本として品質管理方法を設定するものとする。

7.2.1 完了確認時における品質管理項目

(1) 有効モンモリロナイト湿潤密度の確認

難透水性覆土の主要機能である透水係数は、透水試験により確認するには時間が数ヶ月必要となることから、ベントナイト混合率および含水比のばらつきを包含した形で評価可能な有効モンモリロナイト湿潤密度を確認することとする。「6.3 混合土の製造について」に示すとおり、低配合ベントナイト混合土の透水係数は、ベントナイト混合率および含水比の影響感度が高いことから、それらをパラメータとする有効モンモリロナイト湿潤密度を用いて透水係数を整理することで、製造時や締固め施工時のばらつきを包含した整理が可能であると考えられる。

なお、図 6.4-1 に示す室内試験結果より推定した透水係数の近似式と現地施工試験サンプリングによる透水係数試験結果を比較すると、現地施工試験による透水係数値は、おおよそ室内試験結果による近似式の透水係数値以下となっている。このことより、有効モンモリロナイト湿潤密度を透水係数の代替指標とすることで透水係数の品質管理をすることができると考えられる。

なお、室内試験結果と現地施工試験結果の比較については、限定的な条件（ベントナイト混合率 20%～40%、含水比 $W_{opt}-4\% \sim W_{opt}+6\%$ ）における比較であることから、実際の覆土施工時に行う施工試験結果を用いて、品質管理方法の最終決定を行うものとする。

(2) 原位置サンプリング試料による透水係数の確認

原位置サンプリング試料を用いた透水試験結果より、巨視的透水係数として設計透水係数が確保されていることを確認する。

7.2.2 材料納入時、覆土材料製造時および覆土施工時の品質管理項目

完了確認時における品質管理項目である有効モンモリロナイト湿潤密度は、下式で表される。

$$\rho_{emt} = \rho_{em} + \frac{\frac{100}{100 - R_s} w \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

ここに、

$$\rho_{em} = \frac{C_m \cdot \rho_b}{100 - (100 - C_m) \frac{\rho_b}{\rho_{nm}}}$$

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \frac{R_s \cdot \rho_d}{\rho_s}}$$

ρ_{emt} : 有効モンモリロナイト湿潤密度(Mg/m³)

ρ_{em} : 有効モンモリロナイト乾燥密度(Mg/m³)

ρ_b : 有効粘土乾燥密度(Mg/m³)

w : 含水比(%)

C_m : モンモリロナイト含有率(%)

ρ_{nm} : 随伴鉱物の土粒子密度(Mg/m³)

ρ_d : 乾燥密度(Mg/m³)

ρ_s : 骨材の土粒子密度(Mg/m³)

R_s : 骨材混合率(%)

これより、有効モンモリロナイト湿潤密度を定義するための管理項目として、「含水比」「モンモリロナイト含有率(ベントナイト混合率、メチレンブルー吸着量)」、「乾燥密度(現

場密度)」、および「土粒子密度」があげられる。

よって、その他の品質管理では、「覆土完了時」に所定の品質を確保できるように「材料納入時」、「覆土材料製造時」および「覆土施工時」の各段階において、表 7.2-1 に示す所定の管理を実施することにより、有効モンモリロナイト湿潤密度の確認を間接的に行う。この管理基準は、「覆土完了時」の覆土全体の巨視的透水係数が所定の値 ($1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$) 以下となるような目標値として設定する。透水係数と各種代替指標との関係性は、実際の覆土施工時に行う施工試験で確認を行う。

また、図 6.3-2 および図 6.3-3 に示す混合土の製造確認結果より混合土は均質に作製できていることから、表 7.2-1 における覆土施工時のばらつきを確認することで、覆土内に連続的な弱部がないことを確認する。

なお、巨視的透水係数は平均透水係数よりも大きい値となるのが一般的であることから、巨視的透水係数および平均透水係数のどちらも $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下となる。

表 7.2-1 難透水性覆土の品質管理項目(案)

施工フロー	対象	管理項目	管理基準	管理方法		
(1)材料納入 	ベントナイト	(1)-①	基本物理特性 (粒度分布等)	製品における各種品質基準	ミルシート確認	
		(1)-②	モンモリロナイト含有量	所定のメチレンブルー吸着量以上	メチレンブルー吸着試験	JIS Z 2451:2019
	購入砂	(1)-③	基本物理特性 (粒度分布等)	製品における各種品質基準	ミルシート確認	
(2)覆土材料製造 	混合土	(2)-①	材料構成比	所定の構成比	混合前の計量	—
		(2)-②	含水比	所定の含水比	含水比試験	JIS A 1203:1999
		(2)-③	ベントナイト混合率	所定のベントナイト混合率 ※サンプリング試料において一定のベントナイト混合率であることを確認し、均質に混合されていることを確認する	細粒分含有試験	JIS A 1223:2009
(3)覆土施工 	混合土	(3)-①	1層当たり 撒き出し厚	所定の厚さ かさ密度測定 ※フィニッシャーを用いて施工することにより覆土の均質性を確保	測量 密度, 含水比測定	レーザ測量等
		(3)-②	1層当たり 仕上がり厚	所定の厚さ	測量	レーザ測量等
		(3)-③	締固め回数	基準密度を満たす回数	目視	記録管理
		(3)-④	施工範囲	所定の範囲・位置に施工されていること	測量	レーザ測量等
		(3)-⑤	現場密度	所定の現場密度	砂置換法 RI 測定	JIS A 1214:2013 JGS 1614-2012
(4)完了確認 <p>サンプリングにより有意な水みちを形成することを避けるため、サンプリング位置が深さ方向で連続しないことに留意し、埋戻しには元の覆土と同等以上の低透水性の材料を用いる。</p>	混合土	(4)-①	透水係数	所定の透水係数	一軸透水試験	JGS 0312-2018
				所定の有効モンモリロナイト湿潤密度	有効モンモリロナイト湿潤密度を算定	—

第8章 中性子イメージングを用いた土質系材料内部の観察

8.1 概説

覆土には移行抑制機能として低透水性や収着性等の複数機能が期待されており、特に低透水性は重要な設計要件となっている。加えて、放射性廃棄物埋設施設特有の長期的な状態設定を行う必要があるため、部材の経年劣化に伴う初期性能の低下を正しく評価することも求められる。低透水性の初期性能の低下を評価するにあたって、ベントナイト混合土の低透水性を発現している透水メカニズムを解明することで、そのメカニズムに基づく経年劣化事象の理解が進む。これによって、経年劣化まで考慮した覆土設計における長期的な影響評価の蓋然性の向上が期待される。

放射性廃棄物埋設施設を構成する覆土の合理的な設計を行うために、前述のとおりベントナイト混合土の低透水性の発現メカニズムを明らかにすることが必要である。室内試験に基づくマクロな性能評価や低透水性発現メカニズムの概念は、土粒子の配置や間隙構造に起因するものとしていくつか提唱されている [37] [38]。しかしながら、ベントナイト混合土の飽和過程や透水試験時における間隙水の浸透状況を直接的に可視化し、そのメカニズムを評価しようとする試みはなされていない。ベントナイト混合土の低透水性発現メカニズムを理解するために、まずは土粒子間隙を満たす間隙水の挙動を明らかにすることが課題である。

土粒子と水に関する既往研究として、含水量の変化に伴う粘土粒子の構造変化を明らかにした研究 [39] や、分子シミュレーションを用いて粘土鉱物界面の水分子の挙動を評価する研究 [40] が行われているものの、間隙水の挙動を直接的に確認・可視化した研究成果は国内外を問わず数少ない。一例として、粘土鉱物付近の水の挙動に関する研究として、石黒ら [41] は広域 X 線吸収微細構造解析 (EXAFS 解析) により、粘土鉱物と層間水および層間陽イオンの位置構造情報を得ている。

既往の多くの研究において観測対象とされてきた粘土鉱物等の土粒子だけでなく、土粒子周囲や土粒子間隙部に存在している水を対象とした微視的な構造観察手法の活用が望まれる。従来の電子顕微鏡を用いた実験方法では、電子線の安定とともに分析精度を向上させるために真空状態を保つ必要があることから水の観測に不向きである。同様に、X 線結晶構造解析においても、水分子を構成する水素原子は電子を 1 つしか持たず、X 線が作用し難いため観測が困難となる。ここで、非電化粒子線である中性子線は、水素原子の原子核に作用し吸収・散乱され、それ以外の物質を透過するといった特徴を有することから、水の観測に適している。実際、土木の土工分野では、締固め地盤の含水比管理に RI 法 (Radioactive Isotope) が利用されており、線源には中性子線が用いられている [42]。

以上のことから、本研究においては、中性子線を用いた中性子イメージング法により、ベントナイト混合土のような土質系材料内部（土粒子間隙部）における透水試験時の間隙水の浸透挙動の確認・可視化を試みるとともに、本手法の適用性検討および実験手法の最適化を行った。

加えて、国内における中性子イメージング装置を用いた同様の実験結果を観察例として示す。

8.2 中性子イメージングの適用性

8.2.1 実験装置と実験原理

中性子イメージング法は、中性子ラジオグラフィによる非破壊検査(Neutron Radiography Test：以下、「NRT」とする。)による実験方法であり、物質の内部構造を可視化することが可能であることで知られている。また、国内に複数ある中性子発生源は、それぞれが異なる特徴を持っている [43]。今回の実験においては、青森県量子科学センターに設置されているサイクロトロン加速器（住友重機工業製 HM-20V、ビームエネルギー20MeV、最大ビーム電流 $100\mu\text{A}$ ）を中性子発生源として用いて、NRT により試料内部の含水状態の画像取得を行った。本装置においては、サイクロトロン加速器を用いて荷電粒子を加速させ、ターゲット Be に照射することで発生した中性子を用いている。

サイクロトロン加速器他から構成される NRT 装置を図 8.2-1 に示す。照射場での中性子束 $6.0\times 10^5\text{n/cm}^2/\text{s}$ 、コリメータ $L/D=44$ とし、検出器にイメージングプレートを用いて中性子線を高感度で検知する。中性子線照射後のイメージングプレートを回収し、スキャナーによってデジタルデータとして画像化した。



図 8.2-1 中性子イメージング装置 (QSC)

8.2.2 基本的な実験手順

(1) 実験に用いる材料の選定

土質系材料の内部（土粒子間隙）における水の挙動を確認するために、前述の覆土を構成する材料であり、粒度や透水性の異なる砂単体（粒径 2mm 程度の粗粒分を多く含む高透水性な材料）およびベントナイト単体材料（粒径 75 μ m 未満の細粒分を多く含む低透水性な材料）を試料として採用した。本実験において使用した材料を図 8.2-2 に示す。



図 8.2-2 砂とベントナイト

(2) 供試体箱の作製

中性子を照射する際の透過性や被ばく量を考慮し、図 8.2-3 に示す総アルミニウム製の供試体箱を用意した。アルミニウムを用いることで中性子の透過性を高くし、NRT 画像に供試体箱が映りこまないように配慮した。また、被ばく量を減らすことで減衰を待たずに供試体を回収でき、効率的な供試体の交換も可能となる。供試体寸法は高さ 50mm×幅 50mm×奥行き 10mm とした。

土質系材料内部（土粒子間隙）を流れる水の浸透挙動を確認するために、供試体箱には通水機能が必要である。上下に通水用チューブを取り付け、供試体部分の周辺には水漏れ防止用の止水ゴムを配置した。なお、これらはアルミニウムより透過性の低い異なる素材であるが、評価範囲外であるため有意な影響はないと考える。

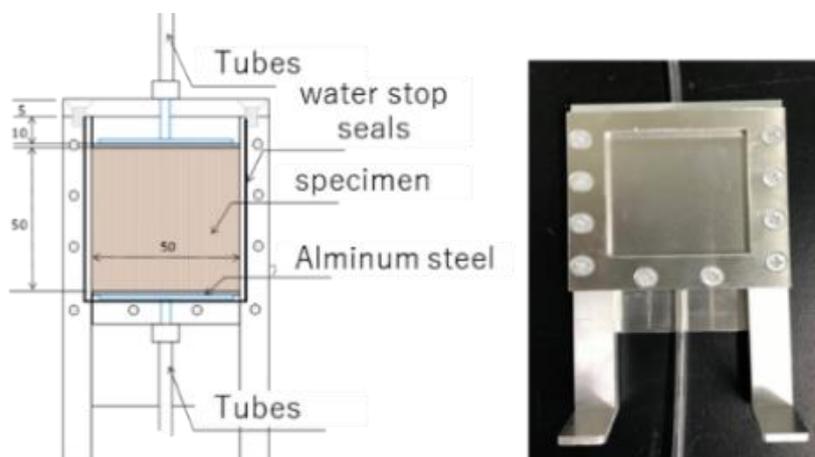


図 8.2-3 アルミニウム製の供試体箱

(3) 供試体の作製

供試体を作製するにあたり、供試体箱をそのまま作製用治具として利用した。作製状況を図 8.2-4 に示す。供試体の体積が供試体箱の内寸で規定されていることから、目標とする乾燥密度および含水比となるように土試料および加える水の重量を予め算出した。土試料と水を混合する際には、含水比が均一になるように霧吹きを用いて水を散布するとともに、手作業で丁寧に混ぜ合わせ、これを供試体箱内で 10mm×5 層で締固めながら供試体を作製した。締固めにおいては、各層の間の密着を良くするために、突き固めた各層の上面にへら等で縦横に線を刻んだ。

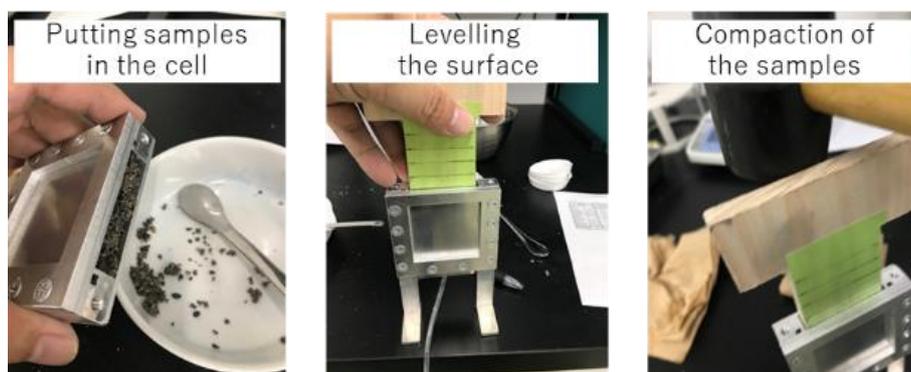


図 8.2-4 供試体の準備状況

(4) 供試体箱への注水

供試体箱内に水を通水するための注水装置を図 8.2-5 に示す。通水装置の高さは約 2m であり、ビューレット（内径 10mm）および排水コックの開閉により、1.5m 程度の水頭差で供試体箱へ下部から注水制御した。ビューレットを複数経路で設置することで、複数種類の液体（後述する軽水および重水）を速やかに注入可能な機構とした。



図 8.2-5 供試体箱への注水装置

(5) 供試体箱の設置および中性子イメージング

NRT の準備状況を図 8.2-6 に示す。イメージングプレートに供試体箱を密着させることで、被写体との距離を可能な限り短くすることにより、鮮明な画像を取得できるようにした。照射後のイメージングプレートをスキャナー（Amersham Typhoon Scanner RGB）により読み取り、デジタル化した画像を取得した。なお、1 回当たりの NRT には 30 分以上を要することに留意が必要である。



図 8.2-6 供試体箱の設置状況

(6) 注水後の試料の状況確認

NRT の実施後、供試体の線量が十分に下がったことを確認し、供試体箱を解体した。解体にあたり、注水後の供試体の状況を確認するため、供試体箱の前面を先に取り外した。この際、供試体箱を倒した状態で、試料乱れが極力なくなるように慎重に行った後に、写真撮影を行った。

(7) 後処理（画像解析）

中性子の特性により水が分布している箇所は周辺に比べてより高輝度となる。デジタル値に変換した NRT 画像を用いて輝度分布を目視確認するとともに、輝度ヒストグラムを作成した。輝度の平均値および標準偏差値により水の分布状況を定量的に確認した。後処理には画像処理ソフトウェア（ImageJ [44]）を用いた。

8.2.3 実験結果

(1) 含水比を変えた供試体の画像比較

① 砂単体に対する中性子イメージング

ベントナイト混合土を構成する材料のうち、母材として使われる砂を対象として、異なる含水比における画像比較を実施した。砂単体の供試体における乾燥密度は $1.72\text{g}/\text{cm}^3$ であり含水比を $w=0.5\%$ 、 4.0% 、 14.0% 、 22.0% と設定して NRT を実施した。NRT 画像および輝度ヒストグラムを図 8.2-7 に示す。

含水比の増加に伴い NRT 画像の輝度が変化していることを目視で定性的に確認できたとともに、画像解析による輝度ヒストグラムから輝度の平均値が定量的に増加していることも確認できた。これより、数%の含水比の違いを NRT と画像解析によって定量的に識別できることが確認された。

また、含水比と輝度平均のグラフを図 8.2-9 に示すとおり、線形関係にあることから、NRT と画像解析による輝度ヒストグラムを用いた本手法により、含水比の変化を適切に評価できていると考えられる。

② ベントナイト単体に対する中性子イメージング

砂と混合して用いられるベントナイトを対象として、異なる含水比における画像比較を実施した。ベントナイト単体の供試体における乾燥密度は 1.15g/cm^3 であり、含水比を $w=7.0\%$ 、 15.0% 、 25.0% 、 35.0% と設定して NRT を実施した。NRT 画像および輝度ヒストグラムを図 8.2-7 に示す。また、図 8.2-7 の左半分は表示輝度を 70~135 に調整した NRT 画像を示す。

砂単体と同様に、含水比の増加に伴い輝度の平均値が増加しており、含水比の違いを NRT と画像解析によって定量的に識別できることが確認された。

また、含水比と輝度平均のグラフを図 8.2-10 に示すとおり、線形関係にあることから、ベントナイトにおいても含水比の変化を本手法により適切に評価できていると考えられる。ここで、含水比 $w=35.0\%$ 時点において、ヒストグラムに偏りが生じており、高輝度側の頻度が若干高くなっている。これは、供試体作製時にダマ（高含水な吸水ベントナイトの団粒塊）が生じて不均質化したことにより、局所的な高含水部が観測されたことが原因と推測され、図 8.2-7 にはダマが潰れた横縞模様を確認できる。

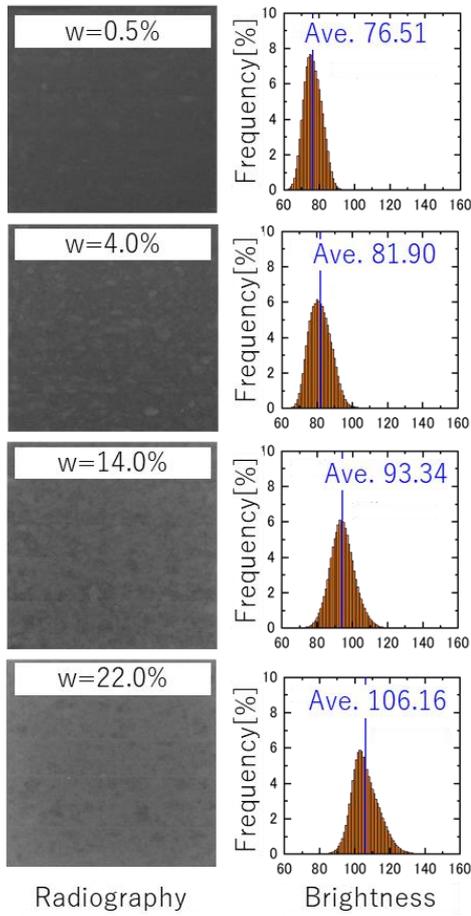


図 8.2-7 NRT 像と輝度ヒストグラム (砂)

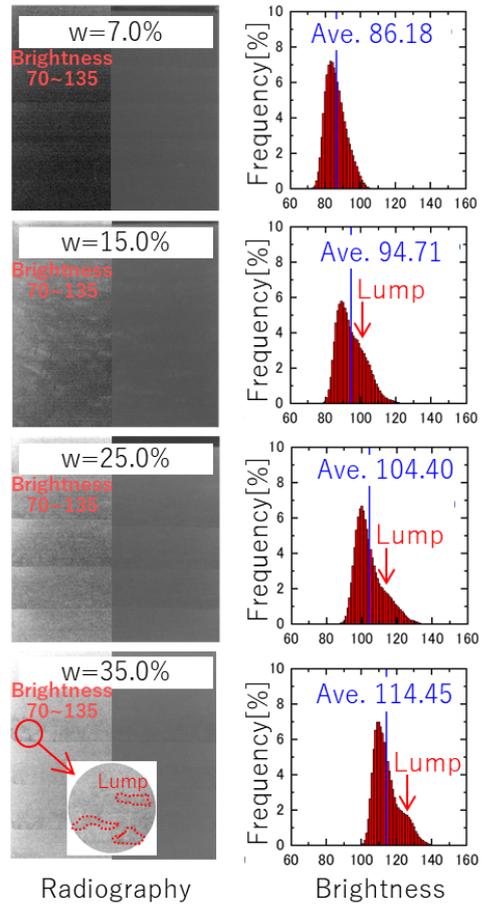


図 8.2-8 NRT 像と輝度ヒストグラム (ベントナイト)

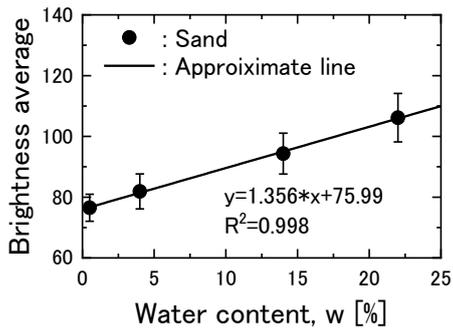


図 8.2-9 輝度平均と含水比の相関図 (砂)

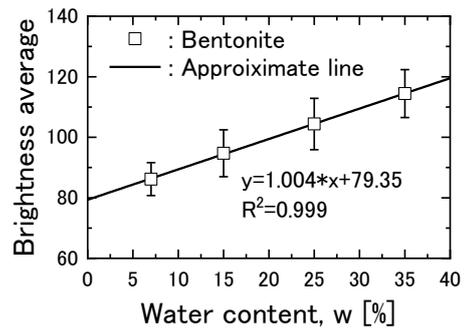


図 8.2-10 輝度平均と含水比の相関図 (ベントナイト)

(2) 軽水と重水を用いた浸透状況の可視化

一般的な透水試験では、不飽和状態で準備した供試体を飽和させた後、供試体内部に水を通水し、土粒子間隙を浸透する水の量を計測することにより透水係数を算出する。この飽和過程および飽和後の通水状況を可視化するために、NRT 画像の輝度が異なる軽水および重水を用いることを試みた。今回の実験においては、透水性の良い砂単体を対象とした。供試体が軽水で飽和された状況で NRT を実施し、その後、軽水飽和後の供試体に重水を注水・置換されていく途中で都度 NRT を実施することで浸透状況の可視化を試みた。

① 軽水および重水単体の中性子イメージング

供試体箱の下半分を軽水および重水単体で満たした状態における NRT 画像および輝度

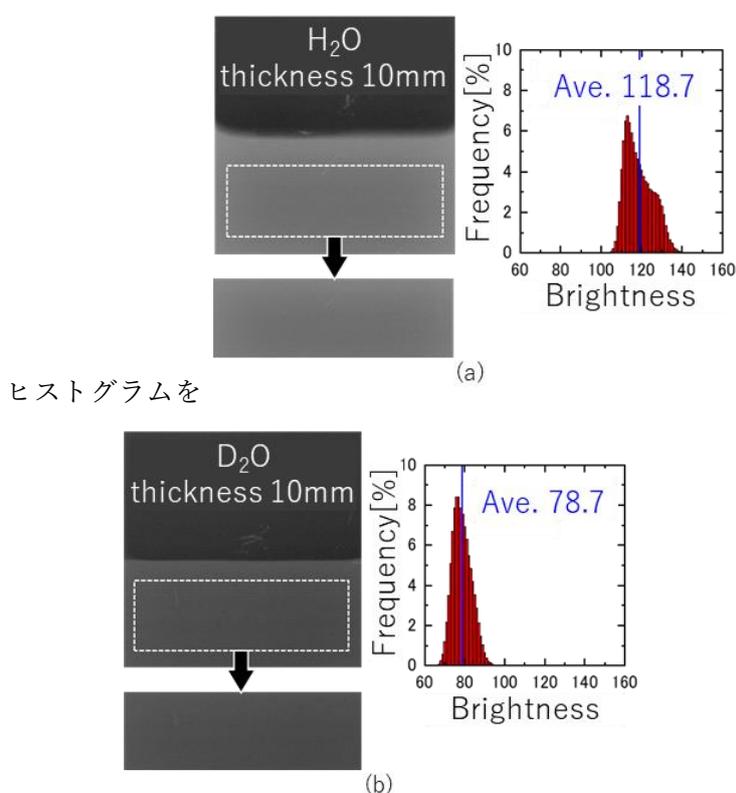


図 8.2-11 に示す。軽水の輝度は 110~120、重水の輝度は 70~80 にピークを持っており、両者の違いは明瞭である。よって、軽水と重水を用いて、軽水飽和した供試体に重水が通水していく状況を確認できると推測する。

② 砂単体における浸透状況の中性子イメージング

初めに、砂単体の供試体（乾燥密度 1.72g/cm³、含水比 w=14%）を軽水で飽和した状態で NRT を実施した。その後、土粒子間隙に充填される水量の約 1/3 に相当する重水を下から注水した後に NRT を実施し、これを合計 3 回繰り返すことによって 3 ステップで重水を供試体内に通水させた。砂単体試料における軽水飽和後および重水通水ステップ毎の NRT 画像を図 8.2-12 に示す。なお、供試体内部の全体が軽水から重水に徐々に置換する様子を一連の流れで確認したいため、同図に示す輝度ヒストグラムは供

試体全体を対象とした。

得られたデータには砂粒子自体の輝度も含まれるため、水単体の輝度を示す

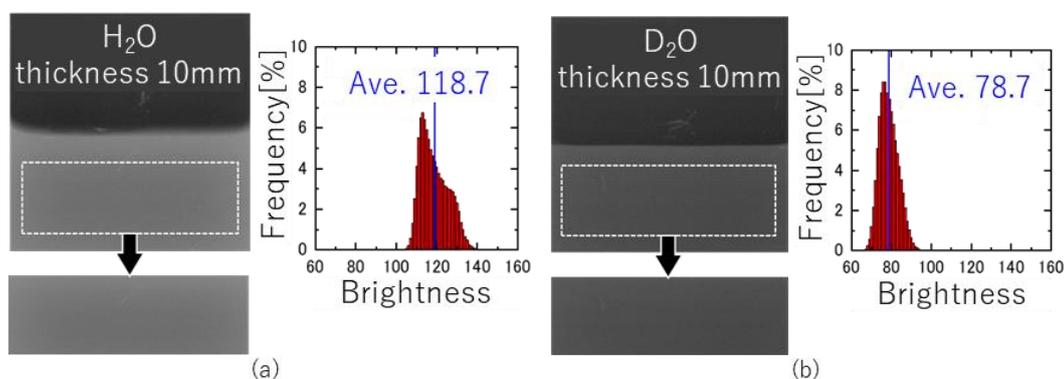


図 8.2-11 とは若干数値が異なるものの、通水と共に画像の輝度に変化しており、ヒストグラムの輝度ピークが重水側にシフトし重水の置換範囲が支配的になっていく様子を確認できた。以上のことから、目視による定性的な確認およびヒストグラム輝度差による定量的な確認ができたと考えられる。

ここで、重水の通水完了時（置換完了時）においても軽水の特徴である輝度 100 付近でヒストグラムの偏りが残っている。軽水が重水に置換されず、土粒子間のメニスカスまたは土粒子周囲に強く吸着し残留している状況を示している可能性が考えられるが、マクロポア（デッドポア）に残留している軽水であることも否定できず、今後の更なる検討が必要である。また、軽水と重水それぞれのピークを持ったヒストグラムが重なっていると考えられる。

③ 実験上の課題

本実験における NRT では、試作した供試体箱を用いた供試体奥行き 10mm の 2 次元画像を得ているため、用いた砂の粒度では、奥行方向に粒子が複数層重なることから、砂粒子間の間隙構造まで詳細に可視化・把握することは困難である。よって、供試体奥行き幅および試料の粒度（粒径）を工夫することで、間隙構造をより明確に確認できるものとする。

また、3 ステップで注水することにより、通水途中の水の挙動を捉えることを試みているが、実際には注水後の照射準備作業等で 30 分以上経過していることから、厳密なその場分析であるとは明言できず、注入水の消散現象や重力影響をどこまで考慮できているかは、考察において注意が必要である。あわせて、ベントナイト単体あるいはベントナイト混合土といった低透水性材料を対象とする場合には、通水に時間を要することから更なる工夫が必要であると想定する。

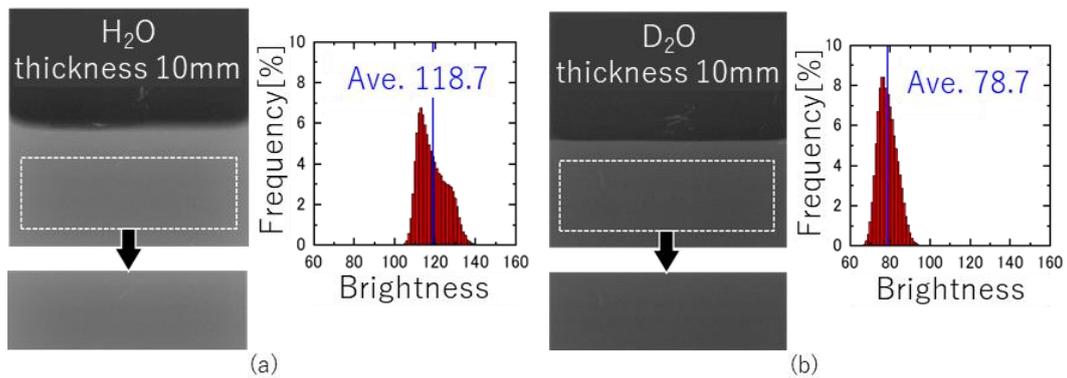


図 8.2-11 軽水(H₂O)と重水(D₂O)の NRT 像と輝度ヒストグラム

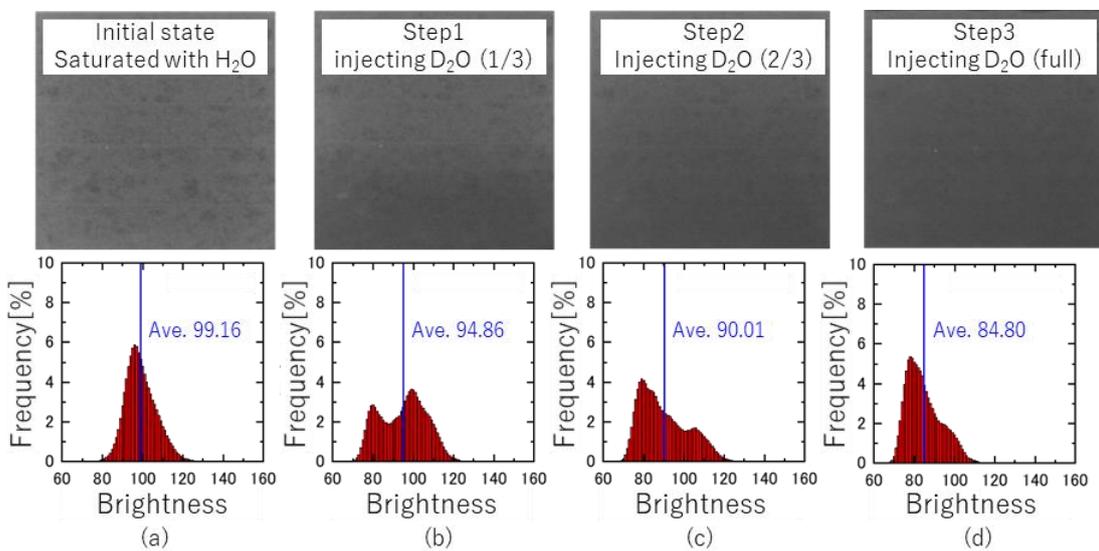


図 8.2-12 重水注水におけるステップごとの NRT と輝度ヒストグラム

8.2.4 実験手法の最適化

前章で明らかとなった留意点のうち、供試体奥行き幅および試料の粒度（粒径）の工夫によって実験手法の最適化をするため、最も画像が明瞭となる材料粒径と供試体サイズの組合せを検討した。単粒砂にこだわらず、代替母材として珪砂 2 号（粒径 1~3mm 程度、乾燥密度 1.25g/cm³）、珪砂 1 号（粒径 3~4mm 程度、乾燥密度 1.20g/cm³）、ガラス玉①（直径 5mm、乾燥密度 1.05g/cm³）およびガラス玉②（直径 2mm、乾燥密度 1.27g/cm³）を用い、軽水飽和した状態で NRT を実施した。あわせて、フィルタリング処理（輝度反転、バンドパスフィルタ）による画像の鮮明化を試みた。

(1) 供試体奥行き寸法の影響に関する検討

代替母材の候補のうち、最も小さな粒径である珪砂 2 号を用いて、異なる供試体奥行き 6mm、8mm、10mm における軽水飽和状態の NRT を実施した。NRT 画像を図 8.2-13、および図 8.2-14(a)(b)に、供試体箱の解体後の試料写真を図 8.2-14 (c)に示す。図 8.2-14 (d)(e)には土粒子間隙に充填されうる水量の約 1/2 に相当する重水を下から注水した状態の NRT 画像および重水注水前後の輝度差分画像を参考として示す。加えて、珪砂 1 号を用いて供試体奥行き 6mm とした場合の同種データを図 8.2-13 および図 8.2-14 に示す。粒径に対する奥行き比を小さくすることで土粒子の構造が鮮明化することが確認できたが、後述するように、奥行きが狭すぎると（例えば砂粒子 1 個分の厚みにすると）、試料と供試体箱接触面の境界に有意な隙間が生じてしまう。そのため、土粒子間隙を通過する水を捉えるという目的を考慮すると、材料粒径に対して著しく小さくならない程度で、可能な限り小さめの奥行きを都度設定することが望ましい。

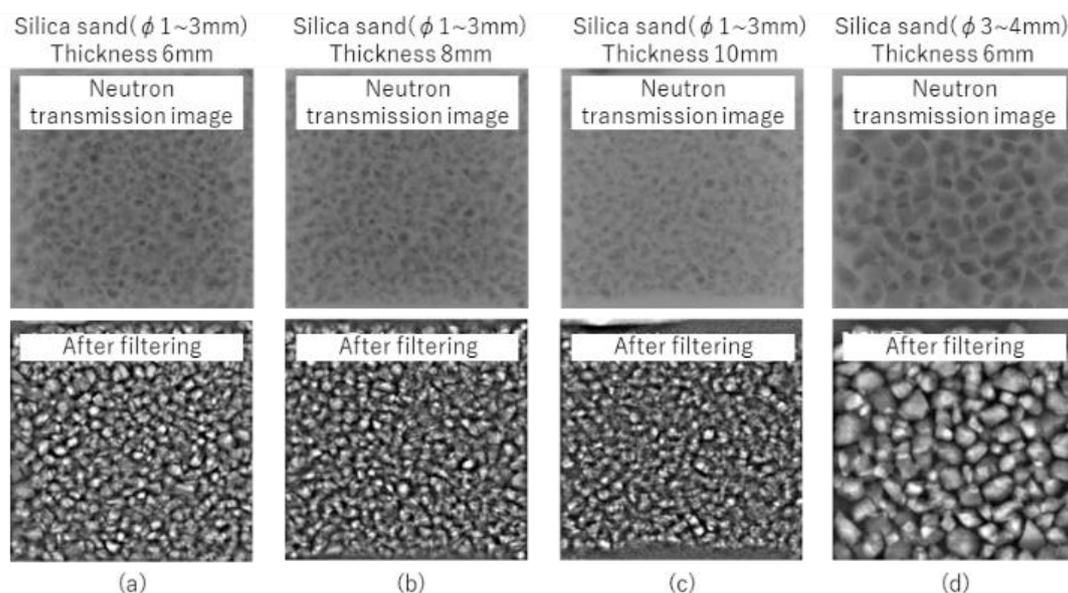


図 8.2-13 異なる供試体厚さによる砂の NRT 画像

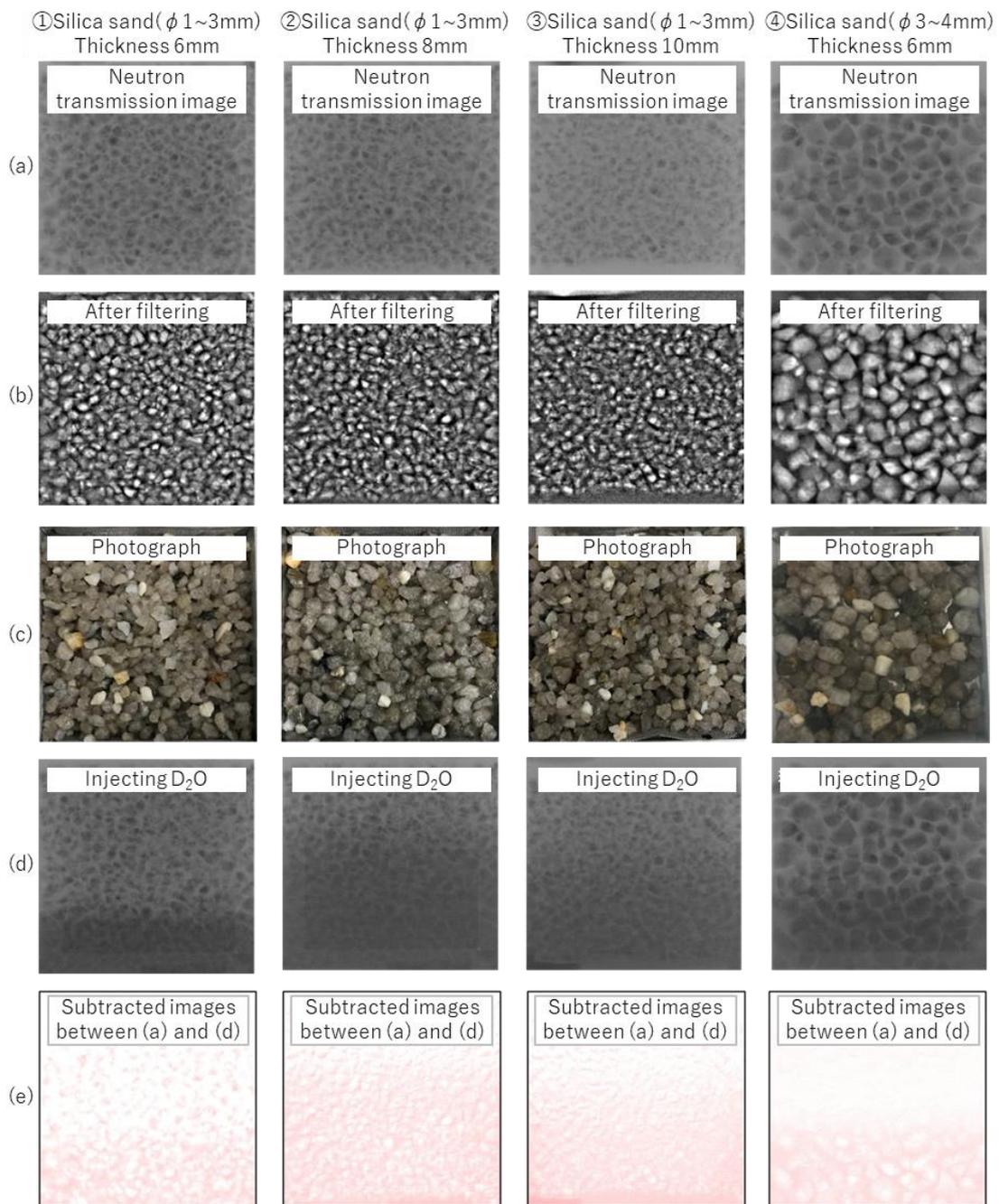


図 8.2-14 異なる供試体厚さによる砂の NRT 像 (補足)

(2) 代替母材の比較結果

ガラス玉①およびガラス玉②を用いて、供試体奥行 6mm における軽水飽和状態の NRT を実施した。NRT 画像を図 8.2-15 および図 8.2-16(a)(b)に、供試体箱の解体後の試料写真を図 8.2-16 (c)に示す。図 8.2-16 (d)(e)には前項同様に重水を注水した NRT 画像を参考として示す。また、図 8.2-16 には試験的に珪砂 2 号と珪砂 1 号を 1:9 および 3:7 で混合した供試体の同種データを参考として示す。ガラス玉①は粒径が大きい分だけ間隙も大きくなることから、構造が見やすいという特徴がある。対照的に、粒径の小さなガラス玉②は不鮮明である。

しかしながら、供試体箱奥行寸法と材料粒径が同等になるにつれ、材料が面上に並んだ状態となり、前述のとおり材料と供試体箱接触面における間隙が大きくなることと、粒子が 3 次元的に配列される実現象と乖離が生じていることから、実在する土の状況に対して供試体の再現性が悪くなることに留意が必要である。

また、図 8.2-17 に、不飽和状態の珪砂 2 号を母材としたメニスカスを伴った水の集合（白色部が水の存在している領域）を観測した結果を示す。珪砂 2 号は比較的粒子が大きいことから観測が出来たものと考えられる。土粒子間の界面張力により生じる粒子間付着水として知られているが、冒頭に説明したとおり、土質系材料において目視以外の方法で確認した事例は少なく、中性子イメージング法による貴重な観測例であると考えられる。珪砂 2 号でのみ確認されていることから、今後対象とする試料の粒径や解像度にも依存するが、中性子イメージング法により不飽和状態にある土の土粒子間の付着水の存在形態（ベントナイト混合土においては吸水したベントナイトと砂の付着形態等）を捉えられる可能性がある。

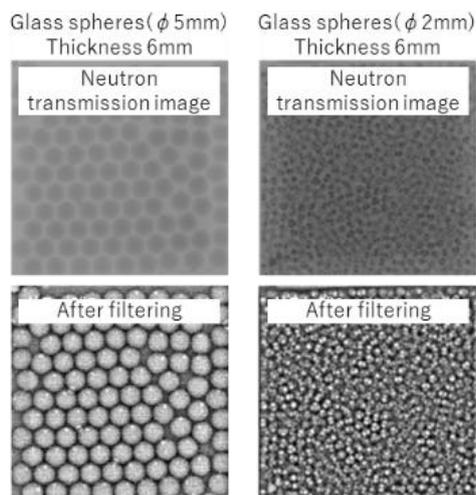


図 8.2-15 異なる材料（ガラス玉）の NRT 画像

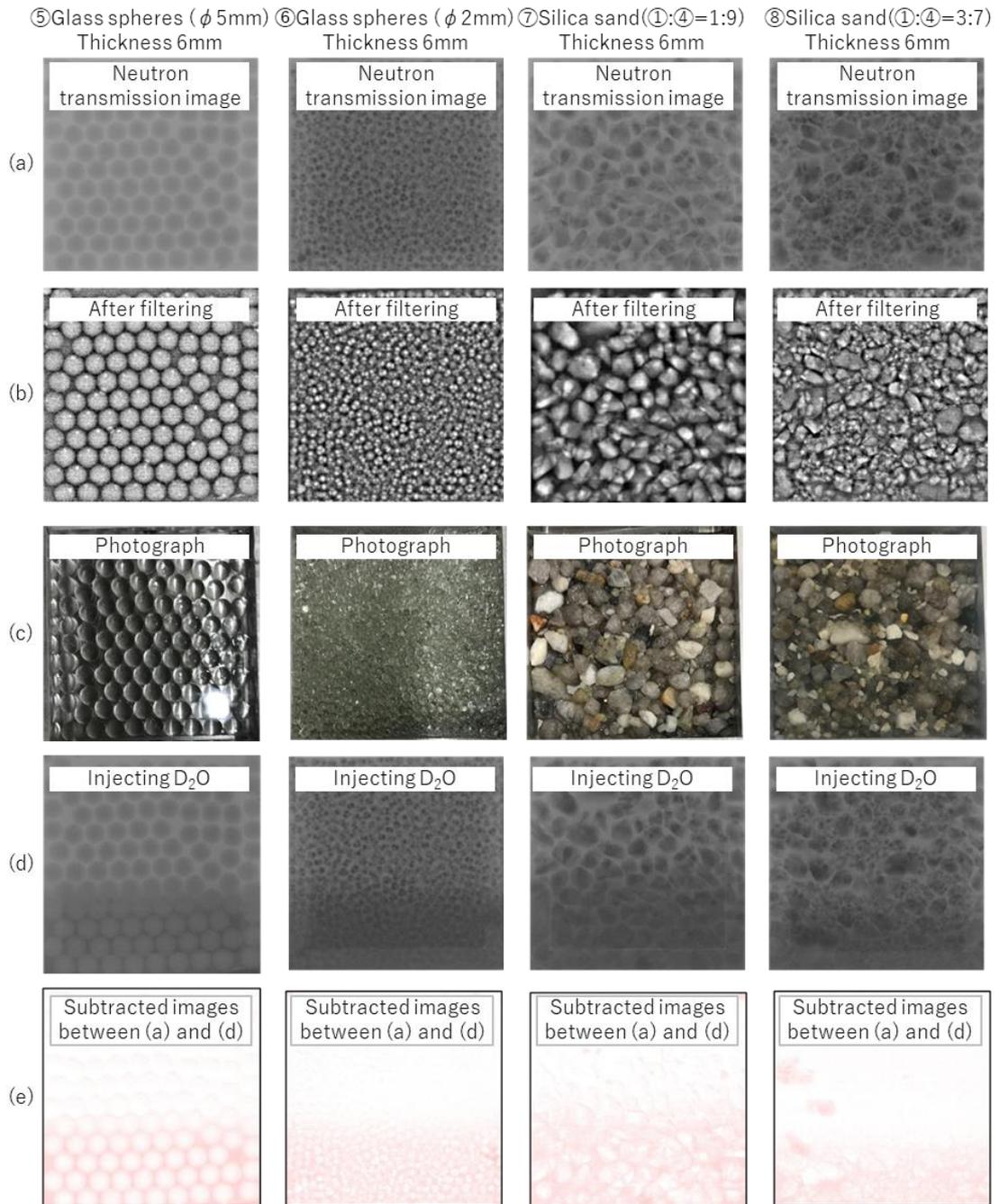


図 8.2-16 異なる材料（ガラス玉および珪砂混合土）の NRT 画像（補足）

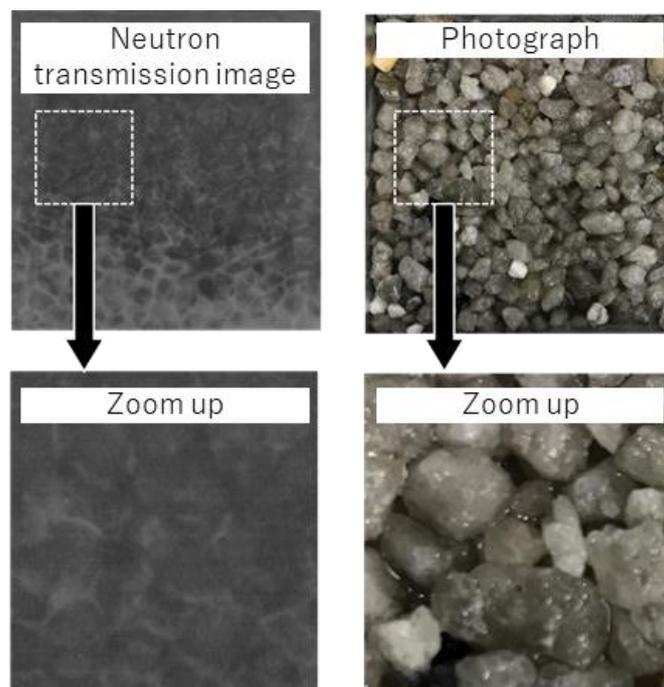


図 8.2-17 不飽和状態の珪砂 2 号の NRT 画像 (補足)

8.2.5 まとめ

ベントナイト混合土の初期性能である低透水性を発現している透水メカニズムを解明することを目的に、その基礎研究として土質系材料に対する中性子イメージング法の適用性を検討した。本手法を土質系材料に適用した事例は少ないが、一例となる試験方法や評価方法を提案できたものとする。本研究で得られた具体的な成果を以下に整理する。

- ・ 試作した供試体箱を用いることによって、土質系材料（砂単体、ベントナイト単体）の含水比について数%の違いをとらえることができ、画像解析による輝度のヒストグラムを用いて含水量の変化を定量的に識別できることが確認された。また、不飽和状態の珪砂 2 号に対する NRT 画像では、土粒子間にメニスカスを伴った水の集合を観測することができた。
- ・ NRT 画像において、軽水および重水の輝度が明瞭に異なっていることを確認した。砂単体に対して軽水飽和を行った後に、輝度差が確認された重水を通水することで、飽和後の通水状況の確認を試みた。供試体内の通水状況について、目視による定性的な確認およびヒストグラム輝度差による定量的な確認ができた。土質系材料単体の内部における水の挙動を視覚的に把握するための手法として、本試験方法による中性子イメージング法は有効であると考えられる。

8.3 MLF (J-PARC) を用いた砂とベントナイトの内部観察例

8.3.1 実験方法

ベントナイト混合土（砂[粒径 2mm 以下]、粘土[粒径 0.005mm 以下]の混合土）の低透水性発現メカニズムを明らかにするため、今回は砂および粘土単体を対象とし、供試体内部に存在する水の分布を中性子ラジオグラフィ/トモグラフィ測定により評価した。

装置は J-PARC MLF（物質・生命科学実験施設）内に設置されている BL22 螺鈿（エネルギー分散型中性子イメージング装置）を用いた。MLF は、世界最高クラスの大強度陽子加速器が作り出す陽子ビームを利用して、世界最強のパルス中性子とパルスミュオンを作り出し、これらを用いて物質と生命の科学研究を推進することを目的とした施設である。螺鈿は、世界初のパルス中性子イメージング専用ビームラインであり、エネルギー分析型中性子イメージング実験だけでなく、世界最先端の中性子ラジオグラフィ・トモグラフィ実験の実施が可能である。

砂の供試体は、図 8.3-1 に示す砂の特性を考慮して 6 種類の含水比を設定し、アルミ製円柱容器（ ϕ =約 10mm、 L =約 30mm）に 3 層で締固めて作成した。ベントナイトの供試体は、予察的に 10%と 50%の含水比とした。

各試料を中性子線の入射軸方向に対して一定の角度で回転させながら透過像を取得し、それら透過像群から 3 次元再断層像の再構成を行った。

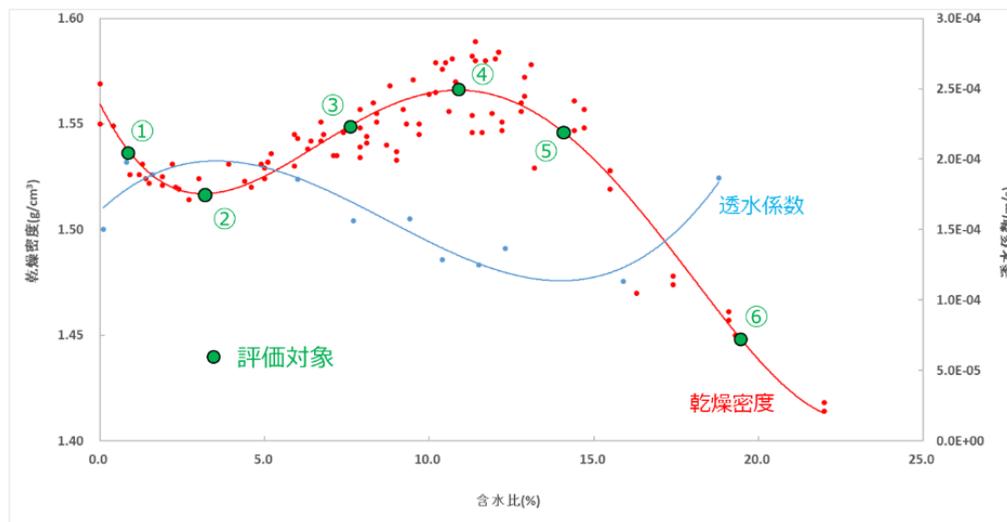


図 8.3-1 砂の締固め試験と透水試験結果

8.3.2 実験結果

(1) 砂の中性子イメージング

得られた2次元透過像および3次元断層像を図 8.3-2 に示す。含水比の上昇に伴い、3次元断層像の白色部（2次元透過像の黒色部）が増加していることから、0%~20%までの水分量の変化をとらえられていると考えられる。また、1層当りで上下方向に水分量の違いが見られ、下部よりも上部に水が存在していることがわかる。各試料を飽和させた後は、全体の水分量が大きく上昇したため、締固め後に明確だった層境界と砂形状が不明瞭となった。今後は、画像解析により分布した水の粒径解析を行うといった定量的な評価が必要である。なお、飽和後の試料で観測された黒い部分は気泡が残った箇所であり、砂が消失しているものではない。

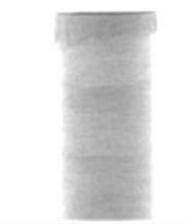
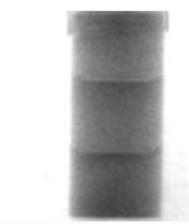
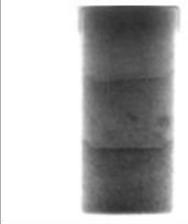
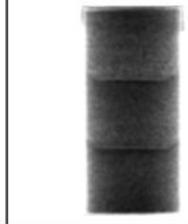
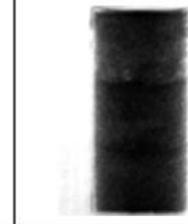
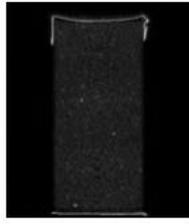
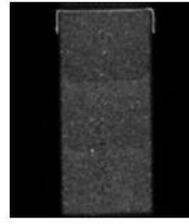
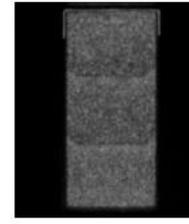
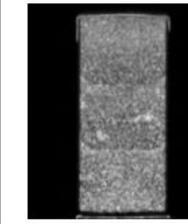
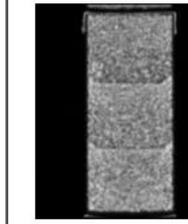
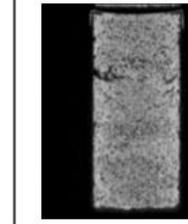
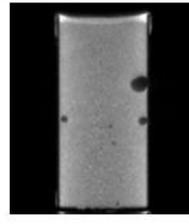
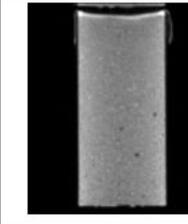
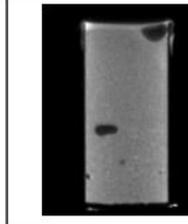
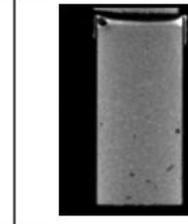
初期含水比	① w=0.7%	② w=3.2% (τ max)	③ w=7.3%	④ w=11.0% (wopt)	⑤ w=14.0% (kmin)	⑥ w=19.3%
締固め後 2次元透過像 (radiography)						
締固め後 3次元断層像 (tomography)						
飽和後 3次元断層像 (tomography)	—		—			

図 8.3-2 異なる初期含水比の砂を締固めて作製した供試体の中性子イメージング像

(2) ベントナイトの中性子イメージング

得られた 3 次元断層像を図 8.3-3 に示す。砂供試体と比較して明瞭ではないものの、低含水比の供試体において網目状の水の構造と層境界が目視できる。また、高含水比の供試体においては砂と同様に不明瞭な分布が確認された。

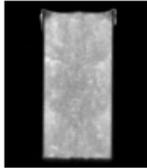
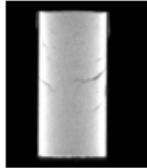
初期含水比	① w=10%	② w=50%
締固め後 3次元断層像 (tomography)		

図 8.3-3 異なる初期含水比のベントナイトを締固めて作製した供試体の 3 次元透過像

8.4 JRR-3 を用いた砂の内部観察例

8.4.1 実験方法

ベントナイト混合土（砂[粒径 2mm 以下]、粘土[粒径 0.005mm 以下]の混合土）の低透水性発現メカニズムを明らかにするため、今回は砂単体を対象とし、供試体内部に存在する水の分布を中性子ラジオグラフィ測定により評価した。

装置は JRR-3 内に設置されている 7R-TNFR 熱中性子ラジオグラフィ装置を用いた。JRR-3 は、昭和 37 年に、わが国初の国産研究炉として臨界に達した後、性能向上を目指した改造を行い、平成 2 年、出力 20MW の高性能汎用研究炉として利用運転を再開した。種々の中性子ビーム実験、原子力燃料・材料の照射試験、ラジオアイソトープやシリコン半導体の製造などを行っており、冷中性子（エネルギーの低い中性子）が利用できることから、高分子の構造解析による生命現象の解明などにも役立てられている。TNRF は、JRR-3 の炉室内に設置されている熱中性子を利用する中性子ラジオグラフィ装置であり、広い照射面積と高い中性子束を持ち、単純な 2 次元の透過像を取得できる。

砂の供試体は、予察的に 1 種類の含水比を設定し（最適含水比 $w_{opt}=11\%$ ）、アルミ製角形容器（ $H=$ 約 50mm、 $W=$ 約 50mm、 $D=$ 約 10mm）に 5 層で締固めて作成した。

容器を台座に固定した状態で、注水を行っている状況を連続撮像することで in-situ 分析を試みた。

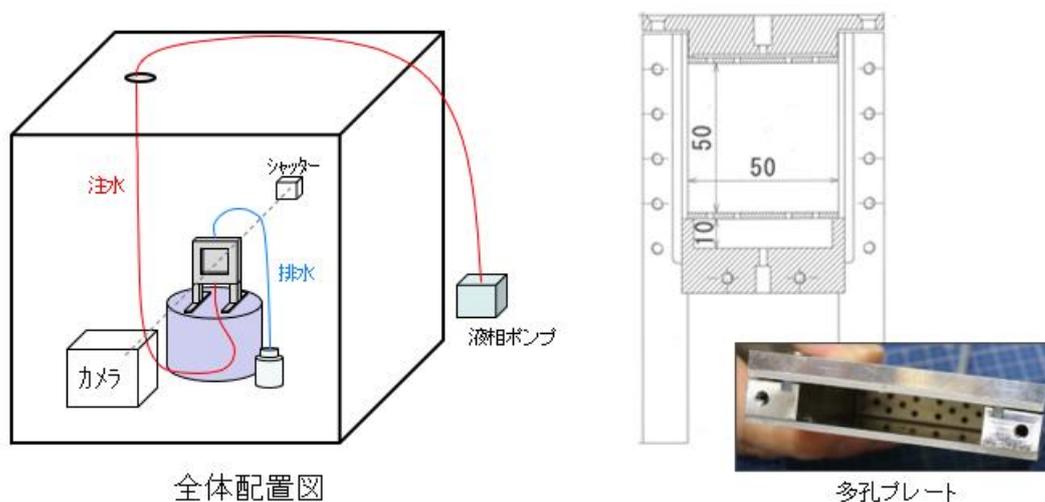


図 8.4-1 全体配置図およびアルミ製角型容器

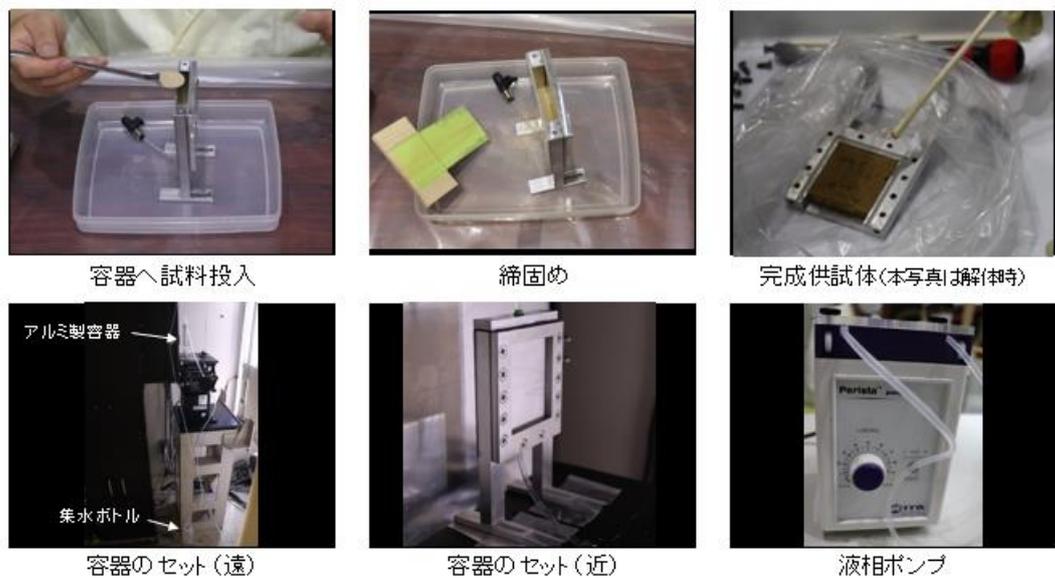


図 8.4-2 供試体作製状況および設置状況

8.4.2 実験結果

(1) 軽水で含水比調整した供試体に対する軽水飽和

供試体の含水比を、軽水を用いて最適含水比（11%）に調整した供試体に、下方から軽水を注水し飽和させた。

注水が進むに従い、局所的な水の流れは顕著に見られず、供試体飽和度が全体的に高まっていく様子を確認した。

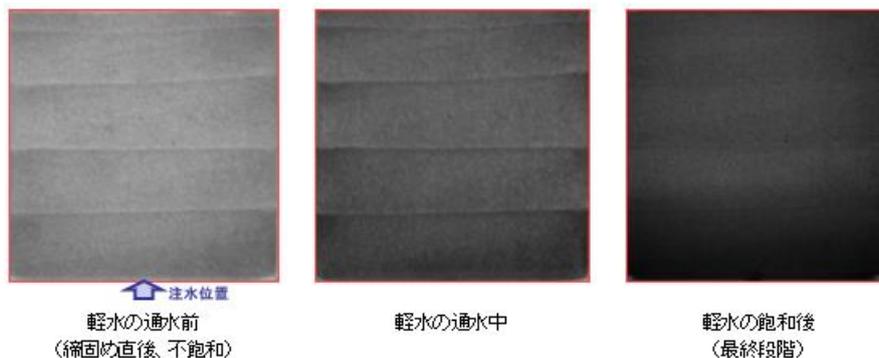


図 8.4-3 軽水の注水（軽水不飽和→軽水注入）

(2) 重水で含水比調整した供試体に対する軽水飽和

供試体の含水比を、重水を用いて最適含水比（11%）に調整した供試体に、下方から軽水を注水し飽和させた。

軽水（黒色部）は供試体全体に広がることなく、下方から徐々に広がっていく様子を確認した。一見、前述の挙動と異なるように見えるが、軽水範囲の拡大に伴い、重水範囲（上部）

の着色が濃くなっている（重水の飽和度が上がっている）ようにも見える。軽水に押された重水が上部に集まり、重水の飽和度が高まっていることが予見される。

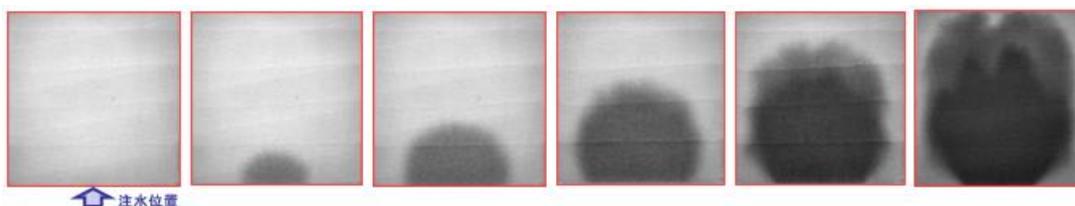


図 8.4-4 軽水の注水（重水不飽和→軽水注入）

第9章 まとめ

本論文の成果を以下に示す。放射性廃棄物の浅地中処分を行う際の基本的な設計方針がまとまった。国内外問わず、今後は本成果をベースに、より原子力安全の高度化に資することを期待したい。

9.1 基本設計～詳細設計

覆土の基本設計（第3章）、廃棄物埋設地の長期影響評価（第4章）および覆土の詳細設計（第5章）により、放射性廃棄物の浅地中処分における設計および長期影響評価について、特に覆土に期待する安全機能に関する体系化を行った。

- ・覆土の基本設計として、設計の考え方を整理し、放射性廃棄物処分の人工バリアである覆土に求められる要求性能として低透水性、収着性、化学的安定性、変形追従性、液状化抵抗性および遮蔽性を規定した。これらの要求性能を満足するために、難透水性覆土の主な仕様として、巨視的透水係数として $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下、厚さ 2m 以上、密度 $1,100 \text{kg/m}^3$ 以上を設定した。
- ・覆土は、数百年先においても公衆への安全を確保できる見込みを示す必要があるため、覆土の長期的な安定性評価により確認を行った。最初に、影響事象分析によって、バリア機能に係る物理的・科学的状態の長期的な変化を予測し、長期的な廃棄物埋設地等の状態を設定する(状態設定)に当たって、廃棄物埋設地の設計において、安全機能のうち長期的な機能を期待する移行抑制機能に影響する可能性のある事象を体系的に分析した。次に、分析結果を踏まえて力学的影響評価（DEM 解析による変形および密度変化の評価）と化学的影響評価（Freeq-C 解析による化学的変質の評価）を実施した。それらの重畳を見込んだ場合においても、算出されたトータル線量のピークは約 $3.3 \mu \text{Sv/y}$ であり、評価基準値である $10 \mu \text{Sv/y}$ を下回ることから、基本設計が長期的な安全性を確保できることを確認した。（技術上の基準に適合）

上記は、原子力規制庁の審査に適合したものであり、技術的信頼性が高いものである。

9.2 施工性試験～品質管理方法の検討

覆土の施工試験を行うことで実現性の確認ができた。また、品質管理方法については、過去事例のない巨視的透水係数の考え方を整理、提案できた。

- ・実施工を見込んだ覆土の詳細仕様（具体的な材料、配合等）の詳細設計を行った。加

えて、実材料および実機を用いた施工性試験を実施した結果を整理し、実施工時の品質管理方法（工法規定方法、物性値管理方法）について検討した。必要な低透水性を備えた覆土の施工実現性確認ができ、品質管理方法については過去事例のない巨視的透水係数の考え方を整理、提案できた。具体的には、巨視的透水係数を空間的なばらつき（平均値、標準偏差および相関長）を踏まえて評価するものである。また、透水係数と相関性の高い有効モンモリロナイト湿潤密度を用いるとともに、現場における管理として3次元管理図による管理方法を提案した。

9.3 中性子イメージングを用いた土質系材料内部の観察

覆土の重要な要求性能である低透水性について、その発現メカニズム解明に向けて、最新技術を用いた試みを行った

- ・今後の更なる合理化設計に向けて、ベントナイト混合土が初期の低透水性を発現しているメカニズムの解明を試みた。中性子イメージング法を用いることにより、土質系材料内部（土粒子間隙部）における間隙水の浸透挙動の確認・可視化を試みるとともに、本手法の適用性検討および実験手法の最適化を行った。国内に複数設置されている中性子イメージング装置を活用し、静的および動的な水のイメージングを実施し、最新技術の適用性を整理した。

引用文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁, “ホームページ,” [オンライン]. Available: https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html#h01. [アクセス日: 31 3 202].
- [2] 山本ら, “国内産ベントナイトおよびベントナイト混合土の基本特性データ,” 原子力発電環境整備機構, 2022.
- [3] (社)土質工学会, 土の締固めと管理, 1991.
- [4] 下水道地震対策技術検討委員会, “下水道地震対策技術検討委員会報告書,” 2008.
- [5] (社)日本道路協会, 道路土工-軟弱地盤対策工指針, 2012.
- [6] (公社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編), 2017.
- [7] (社)地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説, 2009.
- [8] N. E. Agency, “Features, Events and Processed (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste: An International Database,” 2000.
- [9] N. E. Agency, “The NEA International FEP Database: Version2.1,” 2006.
- [10] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, “廃棄物安全小委員会報告書-高レベル放射性廃棄物処分の安全規則に係る基盤確保に向けて-,” 平成 15.
- [11] International Atomic Energy Agency, “Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Results of coordinated research project,” 2004.
- [12] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構, “TRU 廃棄物処分技術検討書-第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-,” 2005.
- [13] 牧野隆吾, “石炭採掘後の陥没現象の解明およびその調査・対策に関する研究,” 応用地質 第 51 巻 第 2 号 p.73-84, 2010.
- [14] 桐山貴俊, “粒子法に基づく地盤大変形解析技術の開発と応用,” 2018.
- [15] 若井明彦ほか, “地すべりを再現するための数値解析手法の現状,” 日本地すべり学会誌 50 巻 1 号、p.7-17.
- [16] 公益社団法人地盤工学会, “地盤工学用語辞典,” 2014.
- [17] 伊藤弘之、三原守弘, ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式, JNC TN8400 2005-029, 2005.
- [18] D. A. C. Parkhurst, “User's guide to PHREEQC(ver.2)-a computer program for speciation,,” U.S.Geological Survey, Water-resources investigations report 99-4259,

- 1999.
- [19] Parkhurst D.L., Appelo C.A.J., “Description of input and examples for PHREEQC version 3,” US Geological Survey, Denver, USA, 2013.
 - [20] D.JACQUES, L.WANG, E.MARTENS, D.MALLANTS, “Benchmarking the cemdata07 database to model chemical degradation of concrete using GEMS and PHREEQC,” 2012.
 - [21] Y.Mikazu, H.Sasamoto, Randolph C. Arthur, “Groundwater Evolution Modeling for the Second Progress Performance Assessment Report,” JNC TN8400 99-030, 1999.
 - [22] T.Sato, M.Kuroda, S.Yokoyama, M.Tsutsui, K.Fukushi, T.Tanaka, S.Nakayama, “Dissolution mechanism and kinetics of smectite under alkaline conditions,” NUMO-TR-04-05, 2004.
 - [23] Cama J. Ganor J. Ayora C. Lasaga C.A., “Smectite Dissolution kinetics at 80°C and pH8.8,” *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000.
 - [24] (独)日本原子力研究開発機構, “TRU 廃棄物の処理・処分技術に関する研究開発平成 20 年度報告－JAEA-Research 2009-049”.
 - [25] S.Yokoyama et al, “Atomic force microscopy study of montmorillonite dissolution under highly alkaline conditions,” *Clays and Clay Minerals* 53(2), 2005.
 - [26] 原子力発電環境整備機構, “処分システムに求められる閉鎖性能の考え方－処分場パネル規模の水理に関する試解析－, NUMO-TR-06-01,” 2007.
 - [27] S.Morihiro M.Ryouichi, “Radio-nuclides Migration Datasets(RAMDA) on cement, bentonite and rock for the performance assessment of TRU waste repository in Japan, JNC TN8400 2005-027,” 2005.
 - [28] (独)日本原子力研究開発機構, “平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 セメント材料影響評価技術高度化開発 報告書,” 2015.
 - [29] 日本化学会, 化学便覧 基礎編 改定 5 版, 東京: 丸善, 2004.
 - [30] 核燃料サイクル機構 東海事業所, “緩衝材の鉱物学的長期変遷シナリオ、JNC TN8400 2005-020,” 2005.
 - [31] Randolph C. Arthur et al., “Development of Thermodynamic Databases for Hyperalkaline, Argillaceous Systems. JNC, TN8400 2005-010,” 2005.
 - [32] A.Atkinson et al, “Aqueous chemistry and thermodynamic modelling of CaO-SiO₂-H₂O gels at 80°C, Doe, DoE-HMIP-RR-91-045,” 1991.
 - [33] (財)電力中央研究所, 地中ケーブル埋め戻し材の開発 (2)－最適粒度分布の検

- 討一 研究報告 175063, 昭和 51 年 7 月.
- [34] (財)国土技術開発センター, 河川土工マニュアル 第 7 章 各論 7.1.2 普通地盤上の嵩上げ・拡幅の施工, 平成 21 年 4 月.
- [35] (社)日本道路協会, 道路土工要綱, 2009.
- [36] (財法)国土技術研究センター, 河川土工マニュアル, 2009.
- [37] E.E.Alonso、N.M.Pinvol、A.Gens, “Compacted soil behavior: initial state, structure and constitutive modeling、Geotechnique 63, No.6, 463-478,” 2013.
- [38] 小峰秀雄、緒方信英, “高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水特性、電力中央研究所報告 (U00041) ”.
- [39] M.Okawara, Y.Saito , K.Soga, “ Study on the mechanism of consistency characteristics of Na-montmorillonite using small-angle X-ray scattering method,” Clay Science,32(2), 19 24, 2019.
- [40] 四辻健治、館幸雄、河村雄行、佐久間博, “分子動力学法によるモンモリロナイト層間中の水とイオンの物性評価-拡散モデルへの反映-、粘土化学、第 56 巻、第 1 号、8-25,” 2019.
- [41] 石黒頌明、本田充紀、大河原正文, “Ca 型、Na 型スメクタイトの EXAFS 解析、第 64 回粘土科学討論会講演要旨集、p109-110”.
- [42] (公社)地盤工学会, 地盤調査の方法と解説 (第 9 編 現場密度試験) , 2019.
- [43] 鬼柳善明, “日本の中性子利用研究と施設連携,” 原子力委員会定例会報告, 2019.
- [44] A. C. Schneider, S. W. Rasband , W. K. Eliceiri, “NIH Image to ImageJ]: 25 years of image analysis, Nature Methods pp.671-675,” 2012.
- [45] 大河原ら, “Spring8,” 2015.