

ベントナイト系材料の工法規定式締固めの適用と締固め密度が
遮水性能に及ぼす影響に関する研究

Study on the application of specified compaction method
of soil materials using bentonite and the compaction
density effects on the water proof performance

2022年2月

山田 淳夫
Atsuo YAMADA

ベントナイト系材料の工法規定式締固めの適用と締固め密度が遮水性
能に及ぼす影響に関する研究

Study on the application of specified compaction method
of soil materials using bentonite and the compaction
density effects on the water proof performance

2022年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建設工学専攻 地盤工学研究

山田 淳夫
Atsuo YAMADA

第1章 序論

1.1	研究の背景	2
1.2	研究の目的	6
1.3	研究の流れ	9
1.4	本論文の構成	11

第2章 中深度処分における低透水層の施工と施工管理

2.1	中深度処分における低透水層の施工に関する具体的な課題	18
2.1.1	材料の敷均しに関する課題	18
2.1.2	転圧時の施工性・締固め性に関する課題	18
2.1.3	施工後の品質確認に関する課題	19
2.2	材料の選定と要求機能を満たす目標値の設定	19
2.2.1	材料の選定	20
2.2.2	要求される低透水性を満たす透水係数の設定	21
2.3	施工試験の概要	25
2.3.1	底部低透水層の施工試験概要	25
2.3.2	側部低透水層の施工試験概要	31
2.3.3	施工時の品質管理方法	38
2.4	施工試験結果	39
2.4.1	底部低透水層	39
2.4.2	側部低透水層	46
2.4.3	地下空洞内の環境による施工への影響	54
2.5	施工後の品質確認	56
2.5.1	品質確認試験の概要	56
2.5.2	透水試験の結果	56
2.5.3	膨潤圧試験の結果	59
2.5.4	底部低透水層における力学特性に係る試験の結果	59
2.6	まとめ	62

第3章 浅地中ピット処分における低透水層の施工と施工管理

3.1	浅地中ピット処分における低透水層の施工に関する具体的な課題	68
3.1.1	材料の配合と施工時目標の設定に関する課題	68
3.1.2	材料の敷均しに関する課題	68
3.1.3	転圧による締固めに関する課題	69
3.1.4	施工後の品質確認に関する課題	69
3.2	配合設定の考え方と施工時の目標の設定	69

3.2.1	要求される透水性を確保するための配合設定.....	71
3.3	実施工を模擬した施工試験の実施.....	79
3.3.1	実施概要.....	79
3.3.2	試験概要.....	79
3.3.3	主要機械.....	82
3.3.4	施工手順.....	86
3.3.5	施工パターン.....	93
3.3.6	品質管理方法.....	94
3.3.7	施工試験結果.....	100
3.4	3章のまとめ.....	110

第4章 施工データより性能確認を行うための代替指標の提案

4.1	本章の目的.....	114
4.2	ベントナイトのみの場合の代替指標.....	115
4.2.1	ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式の概要.....	115
4.2.2	ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式による評価結果.....	116
4.2.3	ベントナイトのみの場合の代替指標を求めるための算出方法.....	118
4.3	ベントナイト混合土中の状態.....	119
4.4	ベントナイト混合土中の通水経路を考慮した有効モンモリロナイト間隙比の定義.....	120
4.5	代替指標と透水係数の関係.....	132
4.6	現場採取データを用いた代替指標の値の算出方法.....	138
4.7	4章のまとめ.....	141

第5章 施工後土構造物の透水性の評価

5.1	施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法の概要.....	144
5.1.1	地球統計学的手法による測定点以外のデータ予測.....	144
5.1.2	三次元飽和定常浸透流解析の概要.....	157
5.2	施工試験後の土構造物の透水性能の評価.....	159
5.2.1	クリギングによる三次元モデル空間の構築.....	159
5.2.2	三次元飽和定常浸透流解析の結果.....	164
5.2.3	計算過程における各段階でのばらつき等の影響評価.....	170
5.3	解析手法による施工のばらつきの許容範囲の評価.....	176
5.3.1	解析目的と解析条件.....	176
5.3.2	解析結果.....	177
5.4	解析手法による測定頻度の影響確認.....	188
5.4.1	解析目的と解析条件.....	188

5.4.2	解析結果.....	192
5.4.3	測定点数による計算精度の検証.....	197
5.5	含水比・混合率のばらつきによる透水性への影響評価.....	201
5.5.1	ベントナイト混合土の練り混ぜ製造時の目標設定.....	201
5.5.2	所定の分布幅を持った含水比・混合率のデータセットの作成.....	201
5.5.3	代替指標と透水係数の相関式を用いた透水係数の計算.....	202
5.5.4	解析結果.....	203
5.6	5章のまとめ.....	209

第6章 測定方法と解析手法との組合せによる品質管理方法の提案

6.1	提案する品質管理方法の概要.....	214
6.2	見かけの層厚変化から乾燥密度を換算する回帰直線に与えるコアカッター法のデータ数の影響.....	214
6.2.1	コアカッター法のデータ数を変えて作成した回帰直線.....	214
6.2.2	コアカッター法の測定頻度を変えて作成した回帰直線を用いた乾燥密度の算定.....	219
6.2.3	異なる回帰直線を用いた場合のクリギング後の対数透水係数への影響評価...221	
6.2.4	三次元飽和定常浸透流解析への影響評価.....	223
6.3	3D スキャナによる方法および施工後土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案.....	226
6.3.1	提案する方法の概要.....	226
6.3.2	現場での乾燥密度の測定箇所の配置例.....	226
6.3.3	材料納品時から施工時における測定項目.....	229
6.3.4	透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案.....	232
6.4	6章のまとめ.....	236

第7章 結論

7.1	結論.....	238
-----	---------	-----

謝辞

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い放射性廃棄物を対象とする中深度処分、いわゆる L1 廃棄物処分の方法として、地下にトンネルを掘削し処分施設を設置する地下空洞型処分施設の具体的な検討が行われている¹⁾。中深度処分とは、地下利用に十分余裕をもった深度（表層から 70m 以深）に廃棄物を処分するものである。これまで中深度処分施設の設計と品質管理の考え方は、土木学会²⁾等により検討されている。施設は複数の部材で構成されており、廃棄体、コンクリートピットおよび低拡散層を包み込むように低透水層が配置される計画である。図 1.1-1 に施設構成を示す。地下空洞内での低透水層の施工は、空間的制約のある条件下での施工となる。このような空間での施工を対象にした既往の検討では、底部における大型振動ローラによる転圧^{3) 4)}、小型振動ローラによる転圧⁵⁾、ブロック定置による方法⁶⁾、粒状ベントナイトの充填による方法⁷⁾、ベントナイトを吹付ける工法^{8) 9)}が取り上げられている。これらの検討での施工規模は要素的な部分を取り出したような規模であり、どの程度の性能のものが構築可能かを探る試験として実施されてきたが、実際の地下空間の環境下での施工システムの実証性の確認と施工後の品質の確認も必要となってきた。

中深度処分施設の部材毎の要求機能は土木学会²⁾によりまとめられている。ベントナイト系材料で構築される低透水層の要求機能は、建設作業段階においては、放射性核種の「閉じ込め」および「作業上の機能」のうち「確実な建設、作業が行われる空間、力学的安定性が確保されること」（以下、力学的安定性の確保）であり、埋戻し後の放射性核種の「移行抑制」である。これらの要求機能を確保するために求められる技術要件は、「閉じ込め」「移行抑制」に対するものとして「透水特性」があり、作業段階の力学的安定性確保に対するものとして「力学特性」がある²⁾。

「透水特性」に関する技術的な要件は透水性が低いことが求められ、これにより、水とともに移動する放射性核種の移行速度を低くすることが期待されている。「力学特性」に関する技術的な要件として、不飽和状態での力学的安定性が確保できる程度の強度が求められている。これは、低透水層を構築した後の工程で、図 1.1-1 に示すように、コンクリートピットの構築、廃棄体の定置、区画内充填材の充てん、低拡散層の構築が行われるためであり、これらの構造物が底部の低透水層への上載荷重となるため、この上載荷重に対して圧壊せず安定することが求められる。このような力学的な安定性の問題は、その後に構築される側部・上部低透水層、および空洞内充てん材が構築されていくことで、次第に地下空洞が閉塞され低透水層は拘束されて変位しにくくなることにより安定していくと考えられる。すなわち、底部の低透水層においては強度も重要となる。

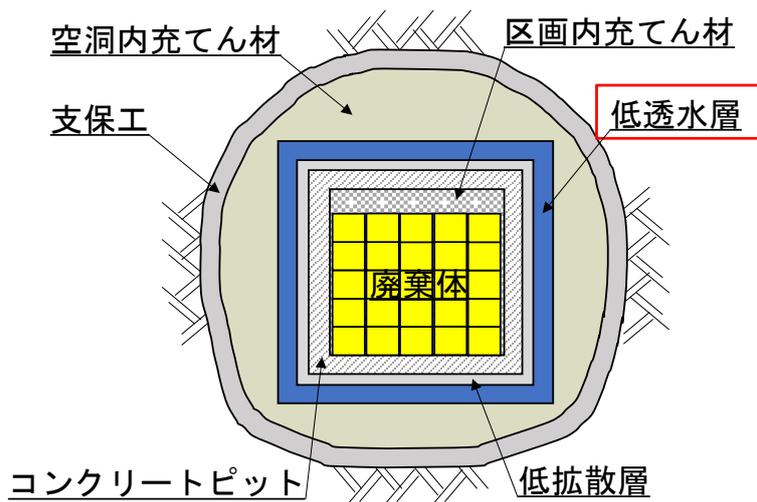


図 1.1-1 地下空洞型処分施設構成（土木学会²⁾を参考に作成）

一方、「放射能レベルの比較的低い廃棄物」を対象とする浅地中ピット処分、いわゆる L2 廃棄物処分は、コンクリートピットを設けた浅い地中に埋設する処分方法に分類され¹⁰⁾、平成 4 年より、青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センターで作業中である¹¹⁾。同埋設センターの施設の概念図を図 1.1-2¹²⁾に示す。同処分施設では、地下水による核種の移行を抑制するために埋設設備の周囲を、低透水性が期待できるベントナイト混合土で覆うことで、埋設設備内への地下水の侵入を極力抑える設計となっている。また、一般廃棄物の処分場とは異なり、放射性廃棄物を扱うことから、長期の耐久性や機能維持も求められる¹⁰⁾。

すなわち、低透水性覆土には二つの機能（低透水性、長期耐久性と機能維持）が期待されている¹³⁾。

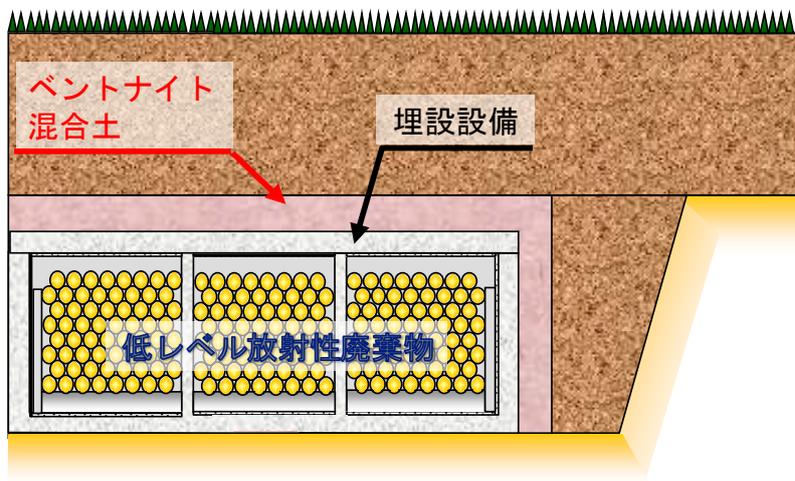


図 1.1-2 浅地中ピット処分施設概念（日本原子力文化財団¹²⁾を参考に作成）

低透水性覆土に期待する低透水性，長期耐久性と機能維持という二つの機能を満たすための施工に係る検討が行われている．表 1.1-1 にその検討の経緯を示す^{13)・52)}．これらの検討は，通常の土工事の転圧施工時におけるプロセスを参考としており，既往技術の適用もしくは改良等を施して対応している．

既往の検討項目として，施工計画・施工・施工中の品質管理・施工後の性能確認の4つに分割して整理した．施工計画の前提となる施設に要求される機能は，日本原子力学会標準¹³⁾等で明記されており，これを受けて日本原燃(株)は安全評価上必要な要求性能を設定し，透水係数を $1.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ としている¹⁴⁾．施工段階でのばらつきを考慮し裕度を持たせた透水係数の施工完了段階での目標値は $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ としているが，この裕度の設定幅についての明確な根拠が無いのが現状である．透水係数の暫定目標値である $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ を満足するために，ベントナイトや砂の材料選定および配合設定を室内での締固め試験や透水試験などより行っている^{14)・20)}．さらにこれらの試験結果より，施工時の乾燥密度・含水比の目標値の設定を行うプロセスの確認もなされた^{18)・21)}．

ベントナイト混合土の製造を含めた施工方法は，ベントナイトを貧配合で混合土を製造し，転圧ローラで施工する一般廃棄物の最終処分上での事例^{43)・47)}を参考とし，これらの既往技術の適用性を検証している^{22)・38)}．さらに，転圧ローラでは施工できない狭隘部の締固めに適用すべく，ベントナイト混合土を吹付けて施工する方法の開発も進められている^{32)・33)・39)・41)}．

施工中の品質管理としては，締固め後の有効モンモリロナイト湿潤密度²⁰⁾と透水係数との相関性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して管理する手法の有効性を確認している^{18)・20)}．しかしながら，有効モンモリロナイト湿潤密度と透水係数との相関性については，理論的根拠が乏しいのが現状ではある．有効モンモリロナイト湿潤密度はベントナイト混合土中のモンモリロナイト含有率と締固め後の乾燥密度より換算される状態量である．モンモリロナイト含有率はベントナイトの混合率やベントナイトの出荷時の品質で一義的に決まる．ベントナイトの出荷時の品質確保はミルシートの確認で対応できる．そのため，施工段階での品質管理手法として，乾燥密度やベントナイトの混合率の測定が重要であり，これらの測定方法に関する検討が進められている^{32)・33)・42)・48)}．さらに，「公益社団法人地盤工学会 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会」において，これまで基準化されていなかった， $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ よりも小さい透水係数を対象とした透水試験方法の基準化に向けた検討も進められている⁴⁸⁾．

性能確認を行う手法は，従来通り，ある採取頻度で試料を回収し，その試料の見かけ密度等によって乾燥密度を測定したり，透水係数を測定することを基本としている^{32)・41)}．しかし，試料の採取頻度，すなわち測定頻度が構造物全体の代表値を評価するのに最適な頻度であるかの確認は未検討である．その他のアプローチとして，構造物全体での平均的な透水係数を数値解析的に求める手法についても検討が進められている^{50)・52)}．

表 1.1-1 低透水性覆土の構築に係る検討状況

	技術的な要件	検討項目	検討状況
施工計画	要求機能の抽出	地下水による移行抑制 施設対応年数が長期	検討済13)
	要求性能の設定	透水係数 化学的安定性	検討済14)
	材料選定	ベントナイト, 土砂	事例有14), 15), 16), 17)
	配合設定	透水係数を満足する締固め条件の抽出	事例有18), 19), 20)
	施工時目標値の設定	乾燥密度, 含水比 ばらつきの許容値 (上げ越し量)	事例有18), 21) 検討中
施工	混合土製造	練混ぜ機械の選定	事例有22), 23), 24), 25)
		練混ぜ時間と品質の関連性把握	検討中26), 27)
		混合率, 含水比のばらつき抑制	要再現性確認28), 29), 30), 31)
	敷均し	均一に敷均しができる方法の開発	検討済32), 33)
	締固め	施工機械の選定	事例有32), 33), 34), 35)
敷均し厚さ, 転圧回数		事例有32), 33), 36), 37), 38)	
吹付け工法の開発		検討中32), 33), 39), 40), 41)	
品質管理	乾燥密度 含水比	従来法の適用性確認	検討済32), 33)
		非破壊測定法の開発	検討中42), 43), 44)
		測定頻度の検討	未検討
	混合率	測定方法の選定	事例有45), 46), 47), 48)
	透水係数	低透水性材料の試験方法の開発	検討済49)
代替指標の検討		検討中20)	
性能確認	構造物全体での透水性の評価	施工後のばらつき把握 乾燥密度, 含水比 混合率 透水係数	事例有32)~41)
		施工後データを用いた浸透流解析	検討中50), 51), 52)
<p>※「検討状況」中の片括弧数字は参考文献の番号を示す。 「検討済」; 検討が終了 「事例有」; 検討事例が有り根拠となり得る成果を得ているが実際に事業を行う段階で再検討が必要 「検討中」; 事例はあるが明確な根拠となっていない段階 「要再現性確認」; 検討事例が有り根拠とするには事例数が少ない 「未検討」; 検討が行われてない。</p>			

1.2 研究の目的

本研究は、低レベル放射性廃棄物処分施設のうち、ベントナイトおよびベントナイト混合土を用いた低透水層の転圧工法による施工において、工法規定方式による施工管理でも十分に要求される性能を確保できる施工が可能であることを示すことが目的である。

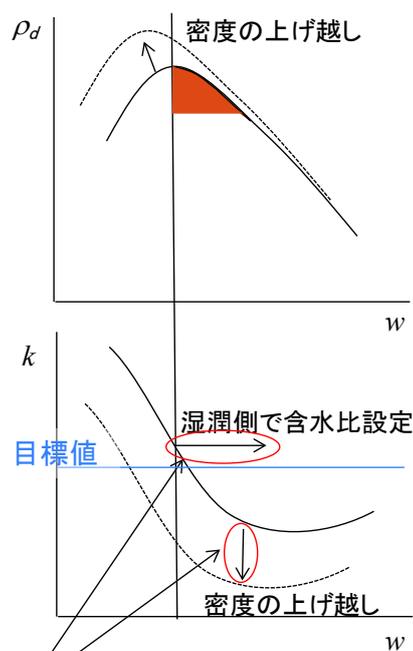
我が国の低レベル放射性廃棄物処分のうちいわゆる L1 および L2 廃棄物処分はともに、地下水面下に埋設施設を設置するため、地下水流動に伴う核種漏洩が懸念される。これらの処分施設は、核種漏洩抑制のため、低透水性を有する人工バリアを設置することとなっており、ベントナイトまたはベントナイト混合土を締め固めて設置する計画となっている。この人工バリア部材の要求機能は低透水性であり、高品質に仕上げる施工が要求されている。

このような人工バリアの構築はダムや盛土などと同様に転圧による締め固め施工によって構築される。そのため、施工管理方法として、これらのような土工事で行われている工法規定方式や品質規定方式の適用が考えられる。このうち、工法規定方式では、施工機械・材料の撤出し厚さ・転圧回数を規定し管理するもので、これらの規定量を満たせば自ずと要求される品質が満たされるものとみなし、少ない頻度で現場密度試験を実施して品質確認を行っている。また、品質規定方式を採用する場合、破壊を伴う現場密度試験の実施箇所が工法規定方式の場合よりも多くなり、構築した人工バリア部材に透水性に関する弱部となる可能性が工法規定方式の場合よりも高い。そのため、破壊を伴う測定の頻度を少なく済む工法規定方式を主な施工管理方法とした方が施工後の構造物の性能の観点からは有利である。工法規定方式を採用するためには、少ない頻度での測定値で品質を評価する必要がある。

そこで、本研究では、低レベル放射性廃棄物処分場のベントナイト混合土の締め固め施工時における施工管理方法（工法の選定や転圧回数の管理、品質測定の測定項目・測定方法・測定頻度）やこの管理方法で取得したデータセットを用いて施工後の構造物全体での品質を評価する方法（要求性能を満足しているのかの確認する方法）についてまとめ、施工段階の施工管理から施工後の性能評価までを総合的に行う方法について提案することを目的とした。そのためには以下の2つの課題を解決する必要がある。

- ・ 施工に起因するばらつきが施工後の構造物全体での性能にどのように影響するのかを評価する。また、要求される性能を満足するばらつき許容度を評価する。
- ・ 施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめる。

まず一つ目の課題であるが、通常の土工事では図 1.2-1 に示すようにある施工管理目標の値を満足するため、締め固め度が目標以上になるように締め固める。この時、本来超過すべき締め固め度よりも大きめの締め固め度を施工管理目標の値として締め固めを行うため、オーバースペックとなる可能性を含む。鉄道盛土・道路盛土・造成地盛土のような要求機能に力学的安定性を求められる場合においては、一部の弱点によって盛土自体がその弱点より崩壊する恐れがあるため下限値管理を行うことは合理的である。



どの程度の裕度を持たせるのか？
 →施工に起因するばらつきによるところが大きい

図 1.2-1 施工時の目標設定の仕方の概念図

しかしながら、本研究で取り扱う低レベル放射性廃棄物処分場のベントナイト混合土の施工においては、主要な要求機能が低透水性であるため、図 1.2-2 の上段に示すようにある割合で締固め度の目標値を下回っても要求機能を満足する可能性がある。これは、局所的に透水係数が大きい箇所があっても、その周囲の透水係数が小さく、通水上の弱点が連なることがなければ機能上問題がないということである。

目標値の設定の仕方の考え方の一つとして、施工に起因するばらつきを抑制できる施工が可能であれば、図 1.2-2 の中段に示すように目標の設定値を小さくすることができる。しかし、この方法では施工時のばらつきの抑制対策をする必要があり、そのためには材料の練り混ぜ製造時（含水比・ベントナイトの混合率）、敷き均し時（高さ・密度）、転圧時（転圧スピード・密度）の施工の各段階におけるばらつき抑制を行う必要があり、その難易度は高いものと思われる。

そこで、本研究では目標値を下回る割合がどの程度までが許容範囲であるかの限界を評価するとともに、施工時のばらつきも含めた目標値の設定の仕方についてまとめる。

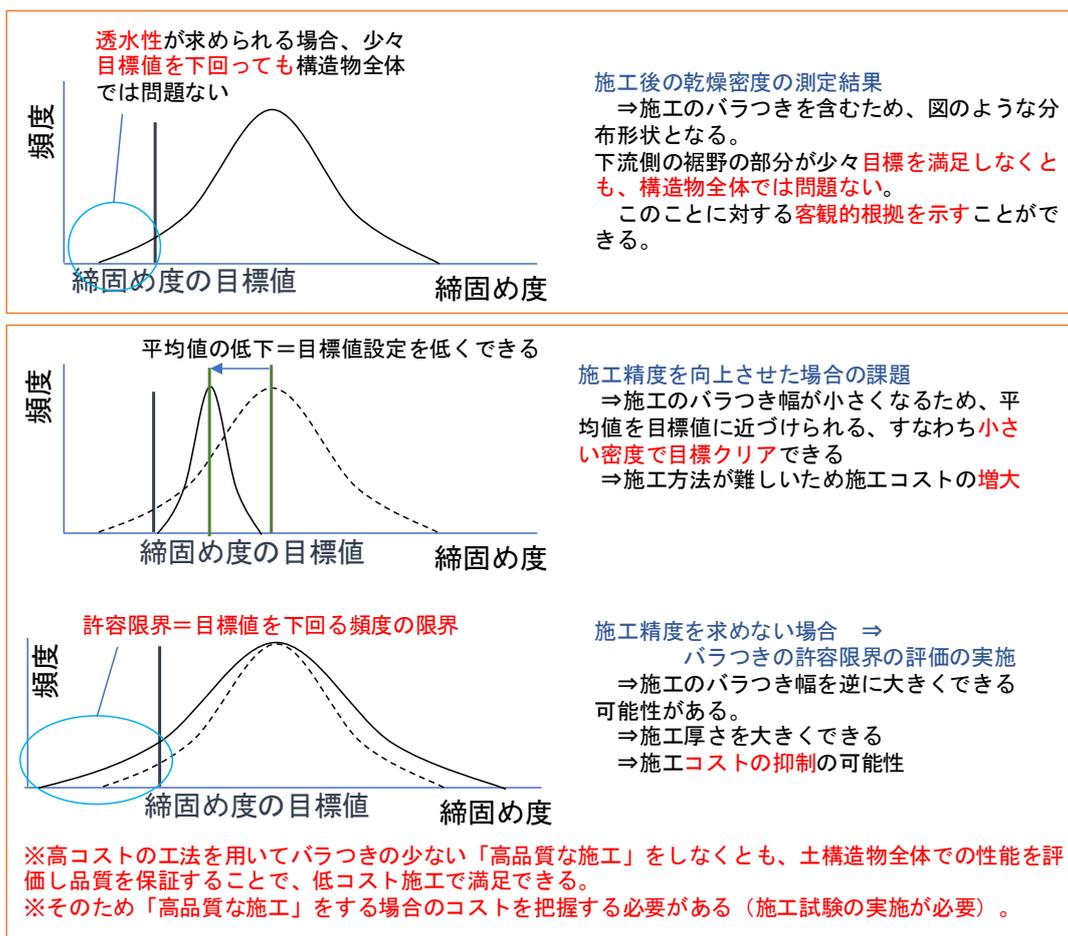


図 1.2-2 施工時の目標値の設定に関する概念図

二つ目の課題は、図 1.2-3 に示すように、どの程度の頻度でデータを採取すれば、その構造物の性能や特性を代表するようなデータセットとして信頼度が置けるものとなるのか、ということの評価することである。ばらつきの許容範囲や目標値を設定しても、適切にデータ採取を行わなければ有意な結果として評価できない。例えば 500～1000m³ につき 1 か所 3 点のサンプリング⁵³⁾によるデータでその規模の土構造物を代表するデータが取得できているのか、ということは施工のばらつきや測定方法の精度に関わるので適切に評価した上で判断する必要がある。これは、ある測定間隔におけるサンプルデータより構造物全体の性能を推定・評価する必要がある場合に直面する問題でもある。

本研究では、測定方法ごとに測定頻度を変更した場合のデータのばらつきを整理し、そのばらつきが構造物全体としての性能に与える影響を評価することで適切な測定頻度の設定の仕方に関する考え方をまとめる。

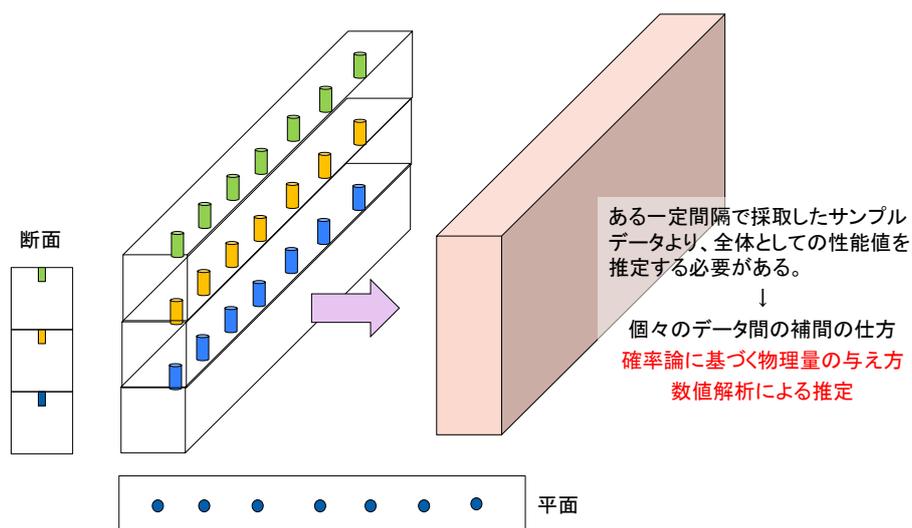


図 1.2-3 サンプルング頻度に関する概念図

1.3 本研究の実施概要

本研究では、以下に示す項目を実施する。

- ・実際に施工試験を行い、データ採取を行う。施工試験では、これまでの既往の知見を活用し、通常の土工事での設計・配合・施工計画・施工の実施・施工時の品質管理のプロセスを踏襲し、要求性能を満足する土構造物の構築ができるのかを実証しながらデータ採取を行うものとする。
- ・施工時の品質管理の段階で要求性能が確認できる代替指標を策定する。具体的には各施工段階において現場で測定できる項目より透水係数を推定する方法を考案する。
- ・施工後に採取した不連続な点情報のデータから点と点の間を補完し連続したデータセットを作成し、このデータセットを用いて、構造物全体での性能の評価を行う手法をまとめる。
- ・施工時の品質測定で取得したデータ（透水係数の代替指標となるデータ）より構造物の性能評価を行う手法を活用し、仮想的に①ばらつきが大きい施工を実施した場合、②ばらつきは同じであるが、測定頻度を落とした場合、の構造物全体での性能への影響を評価する。
- ・最終的に測定方法とその頻度の組み合わせで採取したデータを用いて構造物全体での性能を評価する手法についてまとめる。

以上の項目を検討のフローを図 1.3-1 に示す。

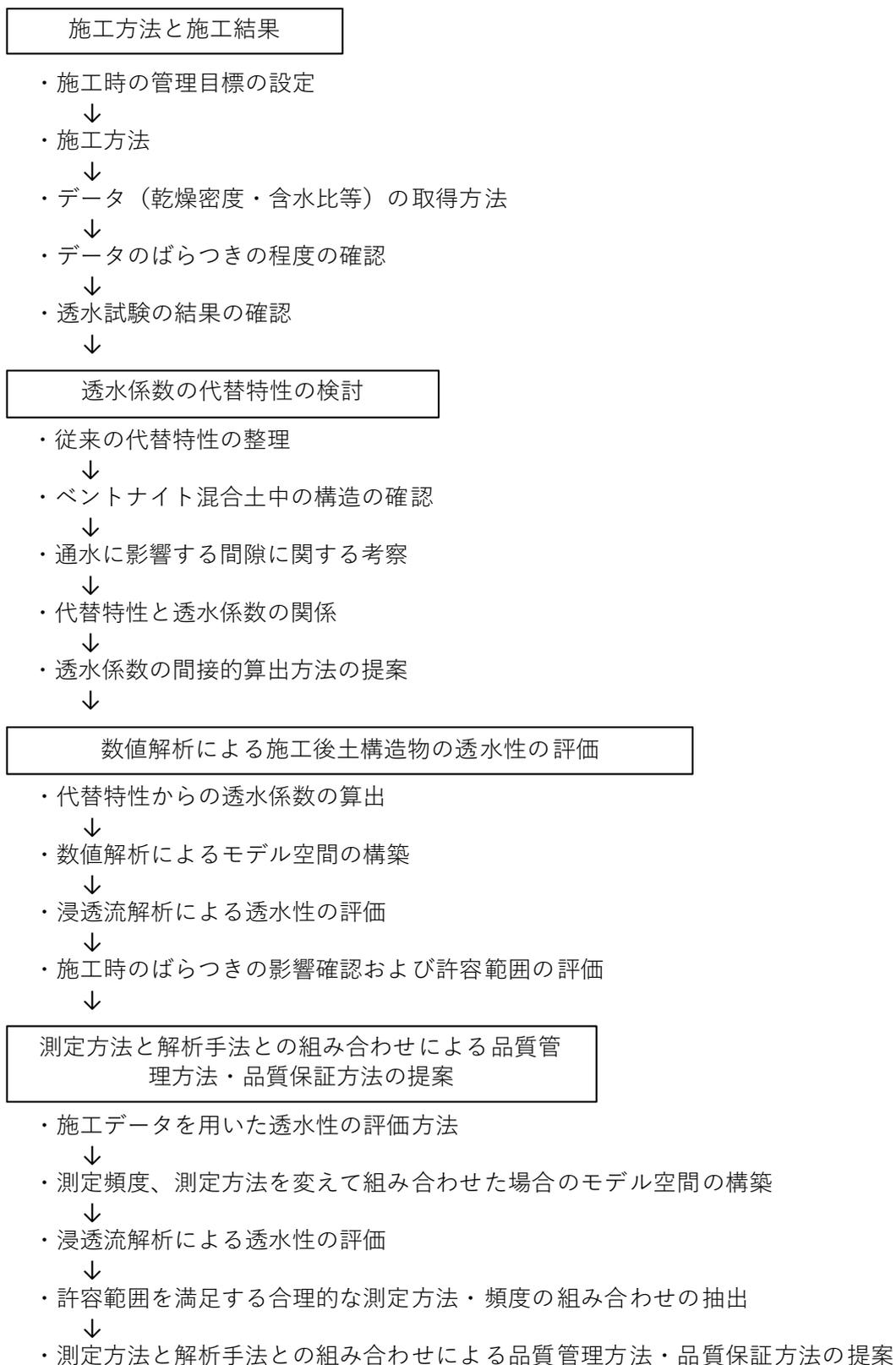


図 1.3-1 本研究での実施項目とそのフロー図

1.4 本研究論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章では、本研究にかかる背景情報と目的・課題、および研究の進め方についてまとめる。

第2章では、中深度処分における低透水層の施工と施工後の品質管理に関する実証性の確認を行う目的で実施した施工試験についてまとめる。第2章では、暫定的に性能目標を設定し、性能目標を満足しうる施工管理上の目標値の設定について説明する。次に施工管理上の目標を満足するための施工方法と施工結果として締固め後の乾燥密度のばらつきについてまとめる。性能確認として透水試験・膨潤特性試験・力学試験結果についてまとめる。施工試験および品質確認結果より、中深度処分における低透水層の施工において工法規定方式の施工管理の適用が可能かを確認する。

第3章では、浅地中ピット処分における低透水層の施工と施工後の品質管理に関する実証性の確認を行う目的で実施した施工試験についてまとめる。第3章では、施工試験に用いた材料の情報や、練り混ぜ方法や施工方法、施工後の品質測定の測定方法、練り混ぜ後・敷均し後・転圧後の測定結果、および施工後の透水試験の結果についてまとめ、本研究での施工方法における転圧後の乾燥密度や透水係数のばらつきの程度について整理する。施工試験および品質確認結果より、浅地中ピット処分における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能かを確認する。

第4章では、施工段階における品質確認試験のデータを用いて即時に透水係数を評価するための代替指標について提案を行う。これは、締固め規定値＝乾燥密度と透水係数との間の因果関係は経験的に取得したものであり、理論的根拠がなく乾燥密度を満足すればただちに透水係数を満足できるとは言い難いのが現状であるからである。そのため実際に透水試験の結果を確認するまで施工した土構造物の透水性能は評価できない。本研究では、このような課題に対する解を提案する。

第5章では、本研究における施工後土構造物の透水性を評価するための解析手法についてまとめる。本研究では、第3章でまとめる施工後のデータと第4章で示す代替指標との相関性より透水係数を求め、この透水係数の三次元空間への配置を数値解析により作成し構造物全体をモデル化する。次に透水係数を配置した三次元モデルを用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施し、マクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）により透水性を評価する。この時、データのばらつき（転圧後の乾燥密度・混合製造後の含水比および混合率）の影響、データの測定頻度の影響について評価する。

第6章では、乾燥密度の測定結果を用いて第4章で提案する透水係数への換算式より得た透水係数を入力値とした、第5章で示す地球統計学的手法と三次元飽和定常浸透流解析を組み合わせた解析手法によって施工後の土構造物残体での透水性の評価（マクロ透水係

数の評価)方法について提案を行う。最後に、本研究で提案する現場での乾燥密度等の測定方法、および測定データを用いて実施する施工後土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案を行う。

第7章では、本研究で得た成果・知見および結論をまとめる。

第1章 参考文献

- 1) 坪谷隆夫, 寺田賢二, 松村勝秀, 大沼和弘, 窪田茂: 地下空洞型処分施設性能確証試験—計画概要—, 土木学会第62回年次講演会, CS5-073, pp.305-306, 2007.
- 2) (社)土木学会: 余裕深度処分の地下施設の設計, 品質管理および検査の考え方, 2009.
- 3) 石原輝行, 五十嵐孝文, 藤原斉郁, 村上利一, 谷智之: 余裕深度処分における底部ベントナイト層の現場施工に関する検討(その1)—大型重機による施工の成立性と品質管理—, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS5-004, pp.167-168, 2007.9.
- 4) 木ノ村幸土, 山本卓也, 石井裕泰, 庭瀬一仁, 谷智之: 余裕深度処分における底部ベントナイト層の現場施工に関する検討(その2)—事後調査報告(注水試験, 平板載荷試験)—, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS5-004, pp.166-170, 2007.9.
- 5) 村上利一, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和, 吉越一郎: 余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS05-003, pp.165-166, 2007.9.
- 6) 吉越一郎, 千々松正和, 中越章雄, 庭瀬一仁, 谷智之: ベントナイトブロックの製作・施工に関する検討, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS05-006, pp.171-172, 2007.9.
- 7) 藤原斉郁, 石井裕泰, 五十嵐孝文, 石原輝行, 山本卓也: 粒状ベントナイト充填による狭隘部人工バリア施工の検討その1—室内試験による施工法の検討—, 日本原子力学会「2008年春の年会」, I33, 2008.
- 8) 中寫誠門, 田中俊行, 小林一三, 戸井田克, 福田勝美, 佐藤竜郎, 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔: 高密度ベントナイト吹付け工法の開発(その1)—高品質なベントナイト構築のための材料供給方法の検討—, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS05-009, pp.177-178, 2007.9.
- 9) 戸井田克, 田中俊行, 中寫誠門, 小林一三, 福田勝美, 佐藤竜郎, 野中克美, 矢部順一, 神津圭輔: 高密度ベントナイト吹付け工法の開発(その2)—密度のばらつきと施工方法の検討—, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS05-010, pp.179-180, 2007.9.
- 10) 経済産業省・資源エネルギー庁ホームページ: 放射性廃棄物について, 低レベル放射性廃棄物, 放射性廃棄物の区分と発生, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html, 2018.1.5 参照
- 11) 日本原燃(株)ホームページ: 埋設事業の概要, 埋設事業のあゆみ, <http://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/history.html>, 2018.1.5 参照
- 12) 一般財団法人日本原子力文化財団: 低レベル放射性廃棄物埋設設備の構造と覆土, 原子力・エネルギー図面集, 第8章放射性廃棄物, 8-2-1, http://www.ene100.jp/map_8, 2018.1.5 参照
- 13) 社団法人日本原子力学会: 低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法: 2010, 日本原子力学会標準, AESJ-SC-F016: 2010, p.60, 2011.2.

- 14) 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 金子岳夫, 千々松正和, 中越章雄: 低配合ベントナイト混合土の長期状態変化を踏まえた設計手法に関する一考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, CS7-017, pp.33-34, 2010.9.
- 15) 諸留章二: カルシウム型ベントナイト混合土の締固め特性と塑性限界の関係について, 土木学会第 68 回年次学術講演会概要集, CS11-015, pp.29-30, 2013.9.
- 16) 工藤淳, 庭瀬一仁, 浪岡翔吾, 千々松正和, 永井裕之, 矢込吉則: ベントナイト混合土に使用する砂の違いが透水係数に与える影響, 土木学会第 70 回年次学術講演会概要集, CS12-020, pp.39-40, 2015.9.
- 17) 千々松正和, 小栗光: Ca 型ベントナイトの品質が難透水性覆土の性能に与える影響に関する検討, 日本原子力学会「2017 年秋の大会」, p.3106, 2017.9.
- 18) 千々松正和, 木村誠, 庭瀬一仁, 工藤淳, 矢込吉則, 河原忠弘: 低配合ベントナイト混合土の現場施工試験における透水試験結果と配合設定に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会概要集, CS13-009, pp.17-18, 2012.9.
- 19) 伊藤紗由未, 小峯秀雄, 村上哲: 砂・ベントナイト混合土の透水係数に及ぼす作製過程の影響, 第 68 回年次学術講演会概要集, III-182, pp.363-364, 2013.9.
- 20) 工藤淳, 庭瀬一仁, 千々松正和, 木村誠, 矢込吉則: 低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の透水性評価の一考察, 第 69 回年次学術講演会概要集, III-152, pp.303-304, 2014.9.
- 21) 工藤淳, 浪岡翔吾, 千々松正和, 木村誠, 矢込吉則: 低透水性材料であるベントナイト混合土の施工品質を評価する代替指標の提案, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), D-10, pp.337-338, 2015.9.
- 22) 岡本大, 西嶋久寿, 谷智之, 河原忠弘, 千々松正和, 高橋隆太郎, 荻原績: 低配合ベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討, 第 66 回年次学術講演会講演概要集, CS3-028, pp.55~56, 2011.9.
- 23) 畠中千野, 木ノ村幸士, 森川義人, 白瀬光泰, 中垣恵司, 細川徹: 螺旋アームミキサを用いた高配合ベントナイト混合土の練り混ぜ性能, 第 67 回年次学術講演会講演概要集, CS13-011, pp.21~22, 2012.9.
- 24) 千々松正和, 木村誠, 石濱裕幸: Ca 型ベントナイト混合土の練り混ぜ方法の違いが品質に与える影響について, 第 68 回年次学術講演会講演概要集, CS11-014, pp.27~28, 2013.9.
- 25) 田坂嘉章, 押部甚一, 千々松正和, 飯島建, 山田淳夫, 秋山吉弘: 連続式練混ぜ機械によるベントナイト混合土の練混ぜ試験, 第 69 回年次学術講演会講演概要集, CS9-020, pp.39~40, 2014.9.
- 26) 山田淳夫, 千々松正和, 永井裕之: 混連時間と加水方法の違いによるベントナイト混合土の透水性への影響, 第 51 回地盤工学研究発表会 (岡山), D-10, 1099, pp.2197-2198, 2016.9.
- 27) 篠崎由梨, 小峯秀雄, 千々松正和, 山田淳夫: 粒状の砂・ベントナイト混合土の締固め性に関する一考察, 第 72 回年次学術講演会講演概要集, III-217, pp.433~434, 2017.9.
- 28) 石濱裕幸, 千々松正和, 荻原績, 中越章雄, 西嶋久寿, 伊藤裕紀, 谷智之, 河原忠弘: 混合率 30~50% のベントナイト混合土の練り混ぜに関する検討, 第 66 回年次学術講演会講演概要集, CS3-030, pp.59~60, 2011.9.
- 29) 武部篤治, 前田和亨, 南浩輔, 藤山哲雄: ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発—(その 2) プロトタイプ試験装置による検証試験結果—, 第 66 回年次学術講演会講演概要集, CS3-032, pp.63~64, 2011.9.
- 30) 和田淳, 久慈雅栄, 南浩輔, 前田和亨, 磯野宗一: ベントナイト混合土の製造に対する縦落とし式混合装置の開発(その 4) —ミストブレンダー工法によるベントナイト混合土の品質—, 第 67 回年次学術講演会講演概要集, CS13-013, pp.25-26, 2012.9.

- 31) 松田武, 山本修一, 木村志照: 高品質な低透水バリア構築に向けたベントナイト混合土施工法の開発 (1) —混合土の製造方法—, 第71回年次学術講演会講演概要集, CS13-020, pp.39-40, 2016.9.
- 32) 山田淳夫, 永井裕之, 千々松正和, 石濱裕幸, 田嶋宏之, 荻原績: 低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の高度化の検討, 第71回年次学術講演会講演概要集, CS13-018, pp.35~36, 2016.9.
- 33) 千々松正和, 山田淳夫, 永井裕之, 田嶋宏之, 石濱裕幸, 荻原績: 浅地中処分施設における難透水性覆土の施工技術の高度化に関する検討, 第72回年次学術講演会講演概要集, VII-065, pp.129~130, 2017.9.
- 34) 千々松正和, 石濱裕幸, 田嶋宏之, 荻原績, 中越章雄: 放射性廃棄物処分における埋戻し材の施工方法に関する検討, 第48回地盤工学研究発表会(富山), K-05, 1091, pp.2181-2182, 2013.7.
- 35) 山本修一, 松田武, 木村志照: 高品質な低透水バリア構築に向けたベントナイト混合土施工法の開発 (2) —敷きならし・締め固め施工—, 第71回年次学術講演会講演概要集, CS13-021, pp.41-42, 2016.9.
- 36) 荻原績, 千々松正和, 高橋隆太郎, 西嶋久寿, 岡本大, 谷智之, 河原忠弘: 低配合ベントナイト混合土の施工性に関する検討, 第66回年次学術講演会講演概要集, CS3-029, pp.57-58, 2011.9.
- 37) 工藤淳, 庭瀬一仁, 矢込吉則, 河原忠弘, 千々松正和, 木村誠: 低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工性試験, 第68回年次学術講演会講演概要集, CS11-018, pp.35-36, 2013.9.
- 38) 松田武, 山本修一, 木村志照, 浪岡翔吾, 工藤淳, 増田良一, 矢込吉則: 大型振動ローラを用いたベントナイト混合土の材料変動による施工品質への影響, 第72回年次学術講演会講演概要集, VII-041, pp.81-82, 2017.9.
- 39) 石濱裕幸, 千々松正和, 荻原績, 中越章雄: ベントナイト混合土の吹付け施工に関する検討, 第67回年次学術講演会講演概要集, CS13-014, pp.27-28, 2012.9.
- 40) 矢田勤, 秋山吉弘, 中島昌樹, 中島貴弘, 竹内信, 石井健嗣, 小林一三: 放射性廃棄物処分における狭隘部ベントナイト緩衝材の吹付けによる施工結果評価について—平成23年度地下空洞型処分施設性能確証試験による—, 第47回地盤工学研究発表会(八戸), K-05, 959, pp.1909-1910, 2012.7.
- 41) 松本江基, 笠博義, 木村誠, 石濱裕幸, 荻原績, 千々松正和, 新井英夫, 箕輪英中: 吹付け工法による急勾配法面へのベントナイト混合土層の施工, 第68回年次学術講演会講演概要集, VII-094, pp.187-188, 2013.9.
- 42) 石濱裕幸, 田嶋宏之, 永井裕之, 千々松正和: レーザースキャナーによる放射性併記物処分施設の遮水層の非破壊密度推定, 第70回年次学術講演会講演概要集, CS12-016, pp.31-32, 2015.9.
- 43) 山田淳夫, 千々松正和, 永井裕之, 壺阪知弘, 菊池喜昭, 龍岡文夫: ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土の施工後の品質確認方法の検討, 第60回地盤工学シンポジウム論文集, 3-3, pp.53-56, 2016.11.
- 44) 永井裕之, 千々松正和, 山田淳夫, 三反畑勇, 壺阪知弘: 難透水性覆土の品質確認へのRI計器, SDGの適用性検討, 第60回地盤工学シンポジウム論文集, 3-4, pp.57-60, 2016.11.
- 45) 千々松正和, 山田敦夫, 雨宮清, 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 金子岳夫: モンモリロナイト含有量の定量化に関する一考察, 第65回年次学術講演会講演概要集, CS7-023, pp.45-46, 2010.9.
- 46) 小栗光, 千々松正和, 西田由紀, 小峯秀雄, 篠木進, 諸留章二: ベントナイトの品質管理のためのメチレンブルー吸着量に関する一考察(その1. 試験方法に関する検討), 第66回年次学術講演会講演概要集, CS3-007, pp.13-14, 2011.9.

- 47) 千々松正和：ベントナイトの品質管理のためのメチレンブルー吸着量に関する一考察（その2. モンモリロナイト含有量の算出に関して），第66回年次学術講演会講演概要集，CS3-008，pp.15-16，2011.9.
- 48) 中島貴弘，山田淳夫，木村誠，千々松正和：ベントナイト混合土の品質管理方法（混合率）に関する検討，第67回年次学術講演会講演概要集，CS13-010，pp.19-20，2012.9.
- 49) 公益社団法人地盤工学会 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会：低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書，2016.12.
- 50) 並川正，森川誠司，笹倉剛，須山泰宏，工藤淳，田坂嘉章，矢込吉則：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の品質評価方法に関する検討（その2）—平均的な透水係数による品質評価方法の適用性の検討—，第71回年次学術講演会講演概要集，CS13-015，pp.29-30，2016.9.
- 51) 森川誠司，笹倉剛，並川正，須山泰宏，工藤淳，田坂嘉章，矢込吉則：低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の品質評価方法に関する検討（その1）—覆土の平均的な透水係数の評価目的とその方法について—，第71回年次学術講演会講演概要集，CS13-014，pp.27-28，2016.9.
- 52) 田中幸久，中村邦彦，工藤康二，廣永道彦，仲神元順，庭瀬一仁，小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価，土木学会論文集C Vol.63, No.1, pp. 207~223, 2007.02.
- 53) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），Ⅱ-8，Ⅱ-11，Ⅱ-12，Ⅱ-19，Ⅱ-20，Ⅱ-21，Ⅱ-26，Ⅱ-27~29，2018.03.

第2章
中深度処分における
低透水層の
施工と施工管理

中深度処分における低透水層の施工と施工後の品質管理に関する実証性の確認を行う目的で実施した施工試験について既往の研究¹⁾²⁾を再構成してまとめる。本章では、暫定的に性能目標を設定し、性能目標を満足しうる施工管理上の目標値の設定について説明する。次に施工管理上の目標を満足するための施工方法と施工結果として締固め後の乾燥密度のばらつきについてまとめる。性能確認として透水試験・膨潤特性試験・力学試験結果についてまとめる。施工試験および品質確認結果より、中深度処分における低透水層の施工において工法規定方式の施工管理の適用が可能かを確認する。

2.1 中深度処分における低透水層の施工に関する具体的な課題

中深度処分施設の低透水層には求められている機能は低透水性・力学的安定性であることは1章で述べた。低透水性・力学的安定性に関する機能を併せ持つ低透水層を構築するためには、十分に高密度に締め固められることが必要と考えられる。

中深度処分で計画されている地下空洞型処分施設における低透水層の施工上の課題は、土質材料の転圧による締固め施工と同様の課題が挙げられる。すなわち、材料の含水比の調整、材料の敷均し、転圧時の締固め性である。また、施工後の品質が要求される性能を満足するものであるのかを確認する必要がある。これらの課題について、以下に詳述する。

2.1.1 材料の敷均しに関する課題

材料の敷均しが粗密で不均一であれば、その後工程でも粗密で不均一に締め固められ、転圧後の乾燥密度にばらつきが生じる恐れや、施工後の表面に不陸が生じる恐れがある。そのため、材料の敷均しを均一・平滑に行うことは重要である。しかし、低透水層の候補材料であるベントナイト系材料を通常の土工事のようにブルドーザー等で敷均しを行えば均一・平滑にはならないため、別の方法で行う必要がある。

また、側部低透水層の施工箇所は、幅1m・高さ約8mの狭隘なトレンチ状の空間であり、実物の処分施設では奥行き方向に100m程度となることが予想される。このような空間的に制限されている箇所に適合した施工システムを検討し選定する必要がある。さらに選定した施工システムにより敷均しを行い、敷均し後の品質を確認する必要がある。

2.1.2 転圧時の施工性・締固め性に関する課題

ベントナイトを施工機械で実際に転圧し、施工性・締固め性を確認する必要がある。また、施工機械の能力が高くても、材料自体の要因により締固め性が悪い場合がある。これは先述の含水比の他にもコンシステンシー、粒度分布といった材料特性が関連しているためである³⁾。そのため、転圧機械による締固めに最適な条件を抽出する必要がある。選定した材料・機械・工法を用いて実際に施工を行い確認する必要がある。

さらに、側部低透水層の施工では空間的に制限された箇所における施工も可能な施工機械を用いる必要がある。そのような施工機械による地下の狭隘空間での施工性および転圧

条件と施工後の品質との関係に関する知見が少ないため、転圧幅・敷均し厚さ等の転圧条件と仕上がり後の品質との関係について、実際に施工を行い確認する必要がある。

2.1.3 施工後の品質確認に関する課題

実際に施工した低透水層が、要求機能を確保できる技術要件を満たしているのかを確認する必要がある。

また、土木学会⁴⁾において、締め固めたベントナイト系材料の乾燥密度と透水係数および乾燥密度と膨潤圧との相関性が示されている。このような相関性は、施工後に乾燥密度を測定すれば暫定的に品質を把握することができるため有用である。しかし、これらの相関性は、主に室内で圧縮成型した供試体を用いた試験結果より得られたものである。そのため、このような乾燥密度との相関性が、実際に施工された低透水層から採取した試料でも成立するのかを確認する必要がある。

以上のように、低透水層には施工上の課題（材料の含水比の調整、材料の敷均し、転圧時の締固め性）および施工後の品質確認に関する課題がある。これらの課題に対する検討内容を表 2.1-1 に示す。それらについて次節以降で説明する。

表 2.1-1 中深度処分の低透水層に関する課題と検討内容

課題		検討内容
(1)	材料の選定と要求機能を満たす目標値の設定	締固め性が高く高品質な低透水層を構築できる材料の選定と、要求機能を満たす目標値の設定について、文献調査や室内試験を実施して設定する。
(2)	材料の敷均し	実機を用いた敷均しを実施し、均一に敷均しできるのかをかき密度を測定することによって確認する。 また、側部の施工においては、材料供給方法・敷均し専用機械について、既往検討を参照し、必要に応じて施行システム的设计・製作後に適用させる。
(3)	転圧による締固め	転圧パターンを変化させて施工し、データを採取する。
(4)	施工後の品質確認	実際に施工した低透水層より採取した供試体を用いて室内試験を実施する。

2.2 材料の選定と要求機能を満たす目標値の設定

低透水層の要求機能を満足するための主な技術要件の一つは、先述のとおり「透水特性」であり、低透水性が求められる。本論文で扱っている地下空洞型処分施設と基本構成が類似した TRU 廃棄物地層処分施設を対象とした既往の検討では、低透水層内部の物質移行が拡散によるものが支配的になることを指向し、拡散場を形成できる条件としてある部材厚さのときの透水係数を $1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ 以下と設定している⁵⁾。施工時のばらつきや長期的な変質等の影響を考慮してこれよりも高品質な低透水層を構築することが望ましい。また、もう一つの技術要件は不飽和時の強度であるが、これに関しては「2.5.4 底部低透水層における力学特性に係る試験の結果」で詳述するように、既往の検討⁶⁾で底部低透水層に上載荷

重が加わった時の検討を解析的に実施しており、力学的に安定であると評価された強度定数（粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ , 弾性係数等）が示されている。その程度の強度定数が確保できれば、十分な性能を有すると判断できる。

ここでは、そのような高品質な低透水層を構築するための材料の選定と施工時における各特性の目標値の設定について述べる。

2.2.1 材料の選定

低透水層としてのベントナイトについて、既往知見をもとにベントナイトが持つ特性および施工性を調査し、検討を行った。高レベル放射性廃棄物地層処分や TRU 廃棄物処分分野でのベントナイト材料として研究されている粉末状ベントナイト（クニミネ工業製（山形県、月布産））は、高い乾燥密度に締め固めるためには大きな締め固めエネルギーが必要である⁷⁾。一方、粉末状にする前の粒状ベントナイト（同じく、クニミネ工業製（山形県月布産）、以下、粒状ベントナイトとする）は、粉末状ベントナイトよりも低い締め固めエネルギーで高い密度を達成することができる見込みが示されている⁸⁾。これらの知見および現場での施工性等の観点から、本論文の低透水層として、粒状ベントナイトを採用した。表 2.2-1 に粒状ベントナイトの材料特性値⁹⁾を、図 2.2-1 に本論文に用いた粒状ベントナイトのふるい分け試験の結果を示す。表 2.2-1 のデータは、母数が 10~80 点であり、「範囲」とは、標準偏差を σ とした時の「平均値 $\pm 3\sigma$ 」の範囲である。また、最小密度・最大密度は、「JIS A 1224 砂の最小密度・最大密度試験方法」を適用して測定した結果としている⁹⁾。

図 2.2-2 に、締め固めエネルギー 15Ec, 4.5Ec, 1Ec で行った粒状ベントナイトの締め固め試験結果を示す。1Ec と 4.5Ec との乖離は大きいですが、4.5Ec と 15Ec との間の乖離はそれよりも小さい結果となった。

表 2.2-1 使用材料・粒状ベントナイトの材料特性⁹⁾

項目	平均値	範囲 (3 σ)
最小密度 (Mg/m ³)	1.191	1.185~1.197
最大密度 (Mg/m ³)	1.407	1.395~1.419
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.650	2.599~2.701
含水比 (%)	7.06	6.67~7.45
液性限界 (%)	346.9	330~360
塑性限界 (%)	22.7	20.3~25.1
pH	10.0	9.9~10.1
メチレンブルー吸着量 (mmol/100g)	72.2	58.0~86.3
モンモリロナイト含有量 (%)	51.5	41.4~61.6
膨潤力 (ml/2g)	14.2	10.5~17.8
鉱物組成	モンモリロナイト, 石英, ゼオライト, 長石, 方解石, 黄鉄鉱	
陽イオン交換容量 (meq/100g)	65.6	55.2~75.9

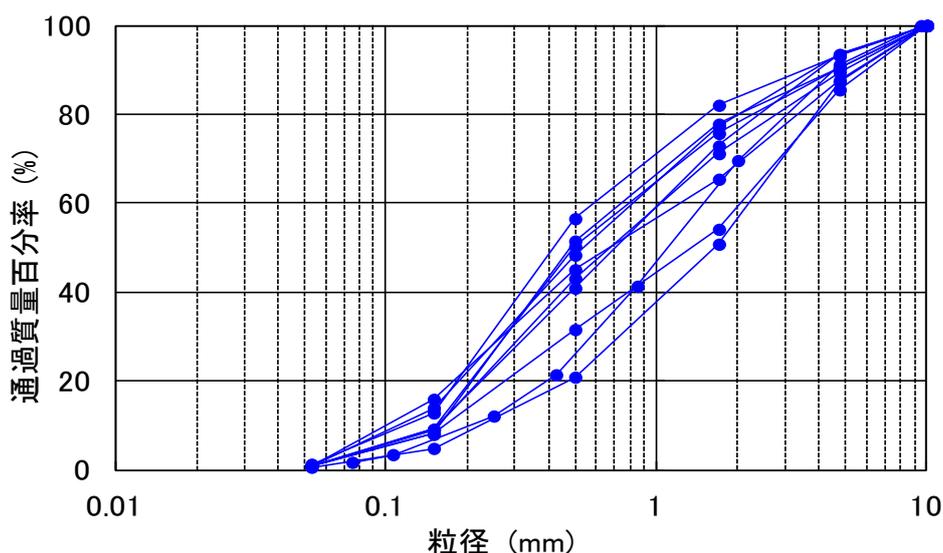


図 2.2-1 粒状ベントナイトのふるい分け試験の結果⁹⁾

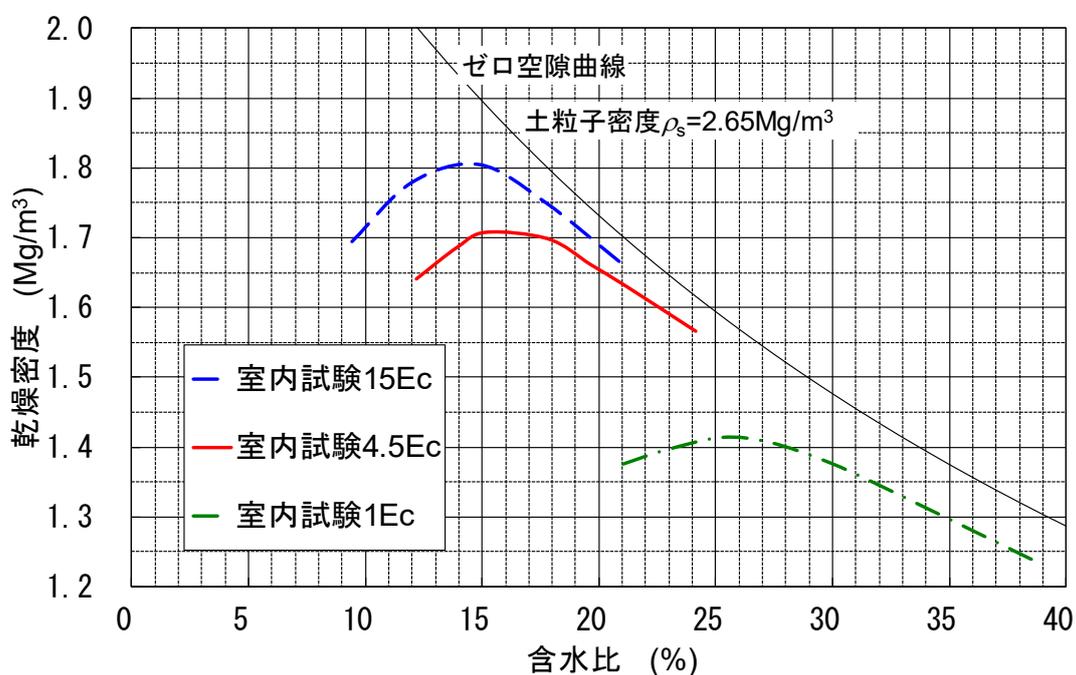


図 2.2-2 粒状ベントナイトの締固め試験結果

2.2.2 要求される低透水性を満たす透水係数の設定

低透水層の技術要件の一つは、先述のとおり透水特性であり低透水性が求められるが、本研究での目標値は、施工時のばらつきや長期的な変質等の影響を考慮し既往研究⁵⁾の透水係数の値 (1×10^{-11} m/s 程度) よりも 1~2 桁程度低い 1×10^{-12} m/s ~ 1×10^{-13} m/s を目指し、その中間の値である 5×10^{-13} m/s を暫定的に目標値として設定した。低透水層の目標厚さ

は、既往研究⁹⁾を参考にして1mとしたが、この値に対して下限値・上限値を定めず施工精度を確認することとした。

低透水層の透水係数をそのまま施工管理上の目標値（以下、管理目標値）として日常的に測定することは、測定時間が長期間（数十日程度）となるため、現実的ではない。現場での施工時においては、日常の施工管理がしやすいよう透水係数に替わる管理目標値を定めて管理することとした。本研究で選定した粒状ベントナイトと産地・材質が同じ粒状ベントナイトの透水係数を測定した既往研究^{10)・11)・12)・13)・14)}の結果より得られる透水係数と乾燥密度との関係は、図2.2-3のような相関を示す。

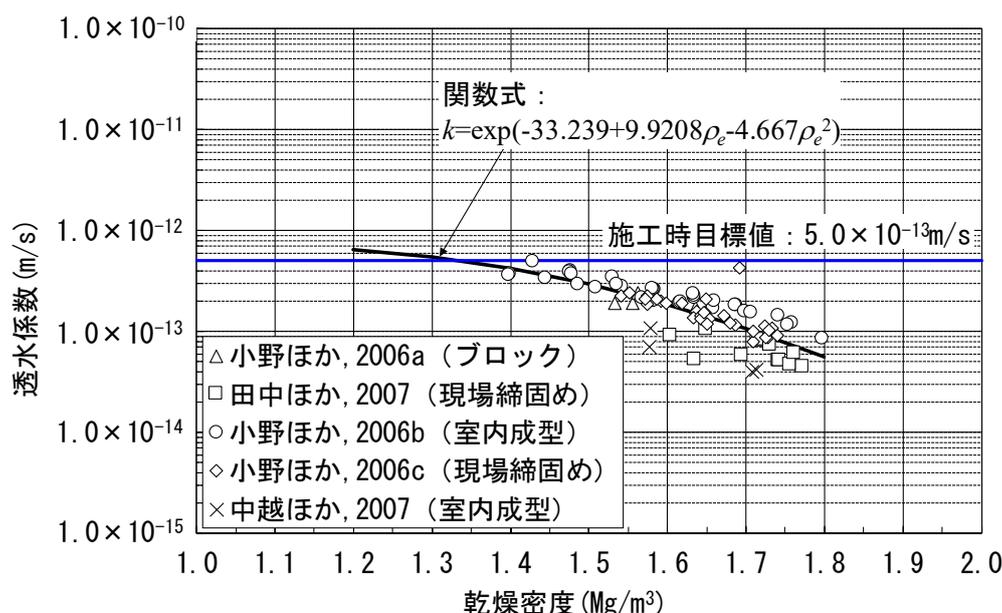


図 2.2-3 粒状ベントナイトの透水係数と乾燥密度との関係^{10)~14)}

一般的な土質材料では、透水係数は含水比にも影響を受けるが、図2.2-3で示したデータの含水比は15~28%程度の中に分布し、乾燥密度の違いによる影響よりも含水比の違いによる影響は小さいと思われる。また、図2.2-4²⁾に示すように締固め曲線上の乾燥密度・含水比における透水係数の最小値は最適含水比よりも湿潤側に現れるが、いずれも $1.0 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ オーダーであり、やはり含水比（初期飽和度）の影響は小さいといえる。そのため、透水係数に与える影響が大きいのは乾燥密度であると考え、乾燥密度と透水係数の相関関係より乾燥密度を管理目標値として採用し、乾燥密度のばらつきを少なくすることを目指した。低透水層の透水係数の暫定目標値 $5 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ に対応する乾燥密度は図2.2-3によれば約 1.4 Mg/m^3 となるが、本研究では、施工時に生じるばらつきに対してある程度の余裕を持たせ若干大きめの乾燥密度とすることとした。また、ベントナイトが吸水した時に発生する膨潤圧が大きくなりすぎることを避けるために乾燥密度には上限値も設け、管理目標値を乾燥密度： $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ とした。別の既往研究¹⁵⁾では、地上に構築した試験用ピ

ット（幅 1m×長さ 17m）の中で 1 層当りの仕上り厚さ 0.1m で行った締固め試験の結果、同一の層内で密度分布が発生するが、材料の含水比が高くなれば分布幅が小さくなること、図 2.2-5 に示す有効ベントナイト乾燥密度と含水比の関係のように報告されている。含水比 21%程度とすれば乾燥密度のばらつきを小さくすることが期待できるので、含水比の調整に係る管理目標値を、含水比：21%±2%とした。

不飽和時の強度を満足するための目標値の目安として、既往の検討 7 で用いた強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、弾性係数等）が適用可能であると考えられる。このような強度定数は、やはり締め固めた後の乾燥密度に影響される。既往の検討 7 で用いた強度定数は、本論文と同じ粒状ベントナイトの乾燥密度：1.619 Mg/m³の時の値であり、もう一つの技術要件である低透水性を満たすために暫定的に設定した施工時の管理目標値である乾燥密度：1.6±0.1 Mg/m³の値の範囲内である。したがって、管理目標値である乾燥密度：1.6±0.1 Mg/m³を満足することによって、自ずと不飽和時の強度を満足すると考えられるので、本研究では施工後に試料を採取し想定通りの強度定数が得られるかの確認を行うこととした。

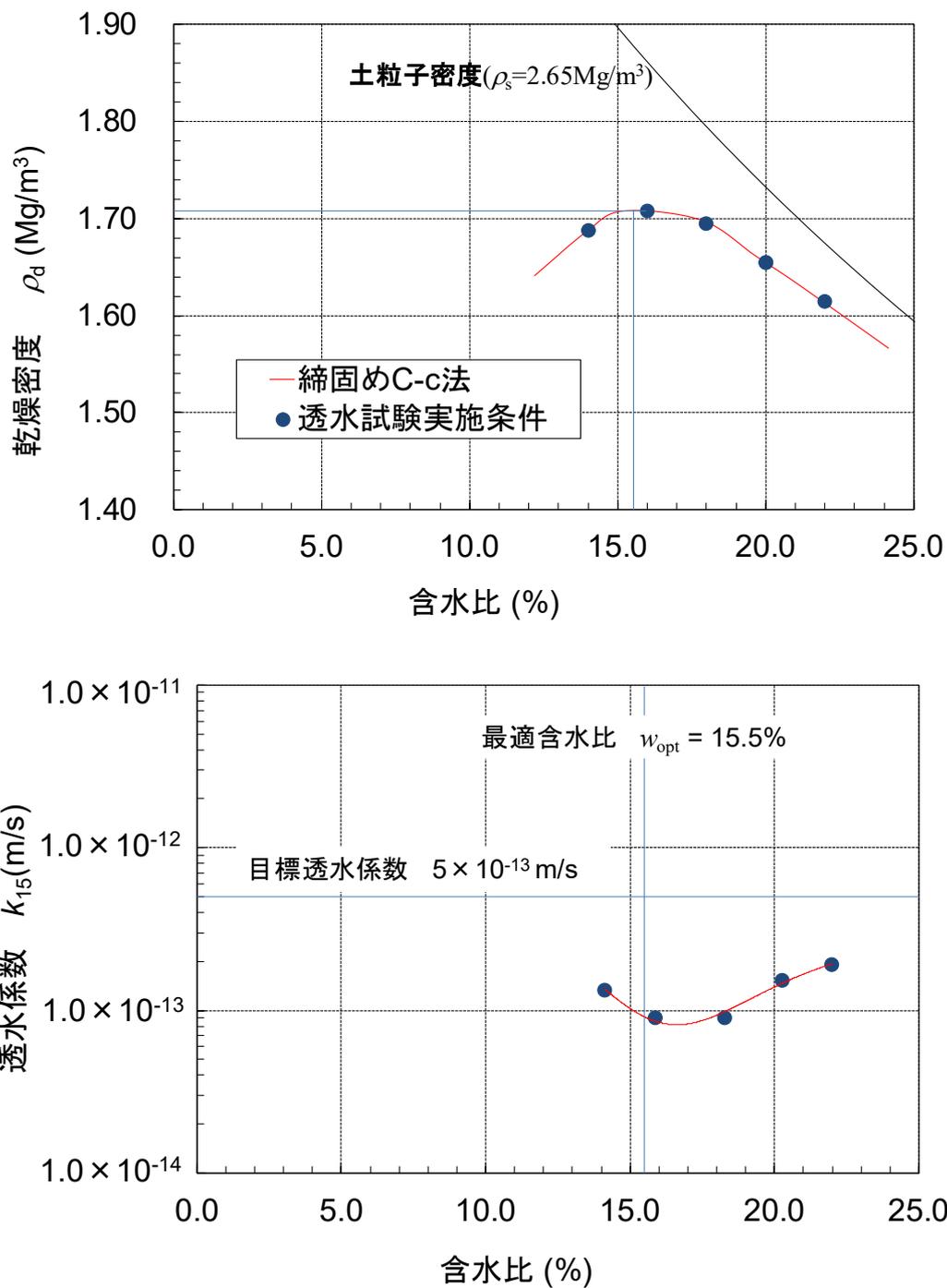


図 2.2-4 締固め曲線および締固め曲線上の条件における透水係数²⁾

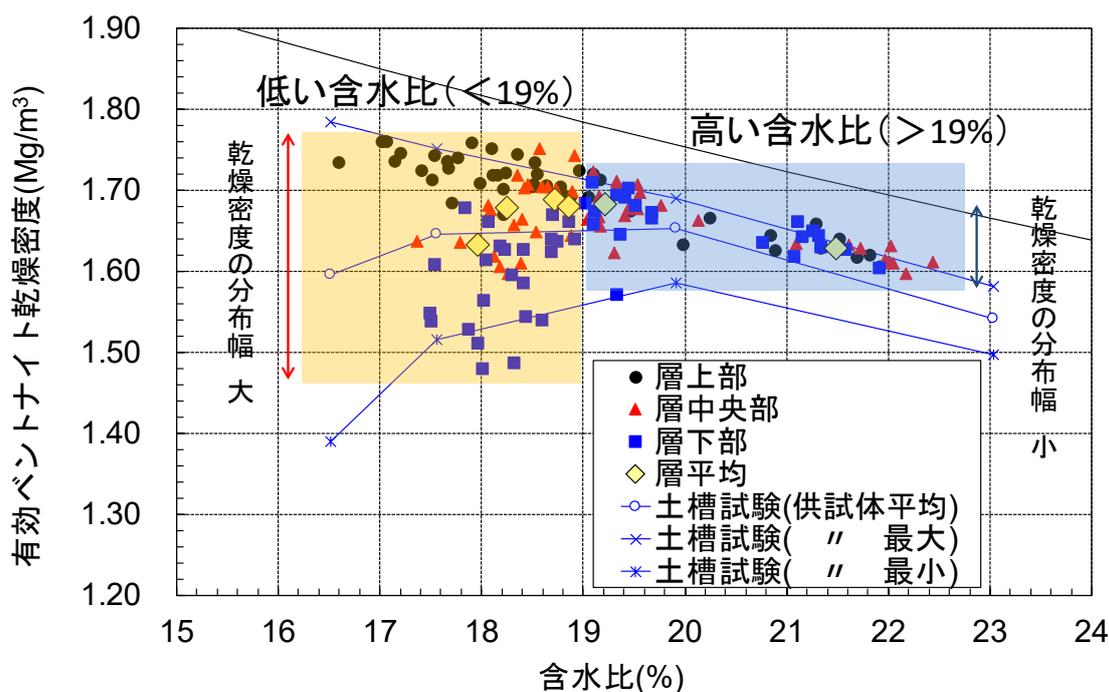


図 2.2-5 層厚方向に3分割したコアの有効ベントナイト乾燥密度の分布¹⁵⁾

2.3 施工試験の概要

2.3.1 底部低透水層の施工試験概要

図 2.3-1 に1層毎の施工試験フローを示す。含水比調整された粒状ベントナイトを使用し、敷均し、予備転圧（2.5t 級舗装用振動ローラ、無振動）、初期転圧（大型振動ローラ、無振動）の各工程を経た後、大型振動ローラによる本転圧（振動）を行った。

予備転圧および初期転圧は、適度な水分を含むベントナイトを高密度に締め固めるには段階的に転圧エネルギーを上げる必要があると考え、施工試験を行いながら省略可能か確認した。また、転圧は締め固め残しがないように、300mm 程度オーバーラップさせた。

既往の研究¹⁶⁾を参考にすると、1層あたりの仕上がり厚さを10cm 程度にすれば、目標とする乾燥密度に到達できると考えられたので、目標とする乾燥密度、施工面積および仕上がり厚さより1層あたりの材料の投入質量を算出し、その結果とアスファルトフィニッシャーの能力より敷均し厚さ20cm 程度と設定した。転圧後の合計厚さが1m となるように施工層数は10層とした。

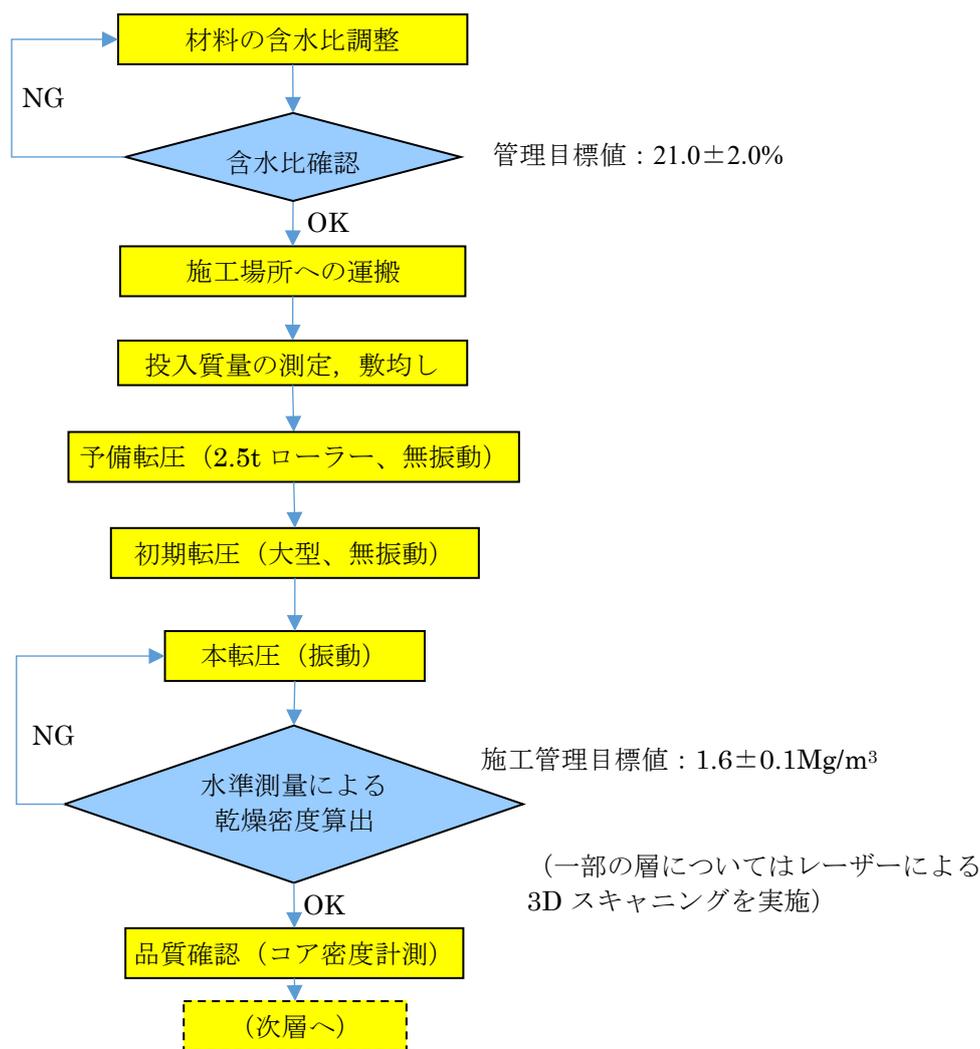


図 2.3-1 施工試験の主要なフロー (1 層毎)

2.3.1.1 敷均し方法

転圧後の乾燥密度のばらつきを少なくするため、材料の敷均しを均一に行うことは重要である。実際の施工時において効率的に敷均しをするためには機械による施工が必要である。本研究での実規模試験における底部低透水層の幅は約 13.5m である。そのため、大型の施工機械で所定の厚さ・幅を確保しつつ均一な密度になるような敷均しの実施が可能か確認した。

敷均しは、図 2.3-2 に示したアスファルト舗装工事などで用いられている大型フィニッシャーを使用し、図 2.3-3 に示したように 3 レーンに分けて実施した。表 2.3-1 に大型フィニッシャーの仕様を示す。

大型フィニッシャーによる敷均し厚さの管理は、左右で高さを自動制御することにより行った。この自動制御の方法は、既に敷均しを終えたレーンがある側は既設レーンとの高さ摺付けにより行い、既設レーンのない側 (もしくは壁際) は図 2.3-4 に示すようにレーザー

第2章 中深度処分における低透水層の施工と施工管理

レベルにより高さを制御するものである。大型フィニッシャーでは敷均しができない奥部（切羽壁際より奥行方向 2m 幅）および手前部（手前端部締切より 1m）を人力で行った。

敷均しの順序は、奥部を行った後、大型フィニッシャーで 3 レーンを施工し、最後に手前部を行った。



図 2.3-2 大型フィニッシャー

表 2.3-1 大型フィニッシャーの仕様

項目	仕様
総質量	19,000kg (5m 幅員時)
全長	6,247mm
全幅	3,191mm (ホッパ閉 2,500mm)
全高	3,780mm (キャノピートップ迄)
舗装幅	2,500mm～5,000mm (伸縮最大幅)
舗装厚	300mm 迄
作業速度	0～20m/min
移動速度	0～20km/h
クラウン量	-2～+4%
振動	0～3,600vpm (バイブレータ)
回転数	0～1,700min ⁻¹ (タンパー)

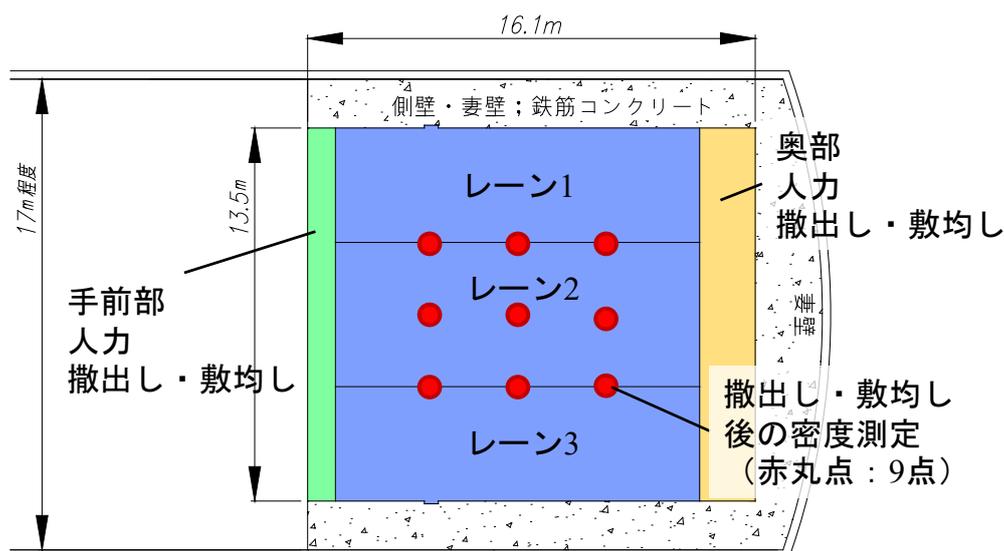


図 2.3-3 大型フィニッシャーによる撒出し・敷均しのレーンおよび区分け（平面図）

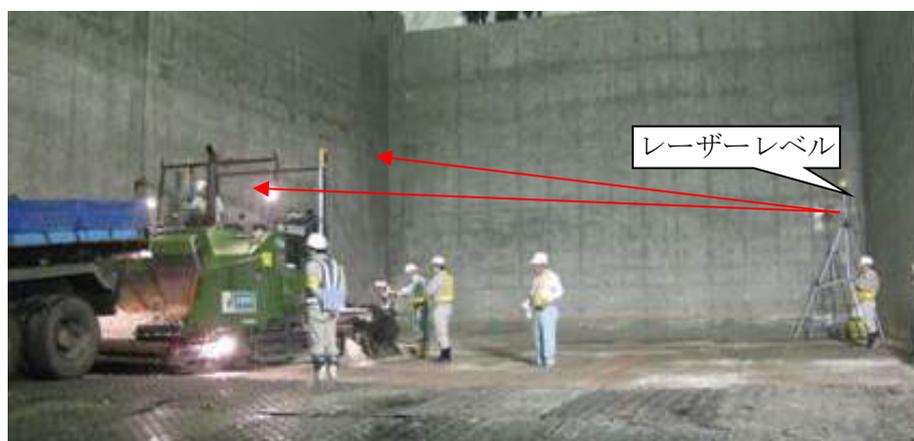


図 2.3-4 レーザーレベルによる敷均し高さ管理

2.3.1.2 転圧方法

転圧機械と転圧回数を確認するため表 2.3-2 に示したような組合せで試験を行った。大型振動ローラは、11t 級および 19t 級を使用し、使用する機械による仕上り品質の違いを確認した。ケース 1～ケース 4 は、19t 級大型振動ローラを用いた場合の検討ケースで、2.5t 級振動ローラによる予備転圧の必要性の有無および大型振動ローラの初期転圧（無振動転圧）、本転圧（振動転圧）の転圧回数について検討を行ったものである。ケース 5・6 については、11t 級大型振動ローラに関する検討ケースである。ケース 7 については、底部低透水層の品質保証に資するための試験ケースとし、同一の転圧方法での施工試験を行い、その際の性能および品質のばらつきを検討するためのデータを取得する試験ケースとした。また、2・5・10 層目を施工した時点での表面の不陸の程度の確認を行った。

図 2.3-5 に振動ローラの種類による施工箇所の分けを示す。中央付近である一般部、転圧機械の乗り込み口である手前端部、壁際の大型振動ローラが施工できない奥部および側部に分けした。

予備転圧は、アスファルト舗装時の締固めに使用される 2.5t 級舗装用振動ローラで行った。奥部・側部の初期転圧・本転圧には図 2.3-6 に示す 1.5t 級の小型振動ローラを使用した。この小型振動ローラは、本来トレンチ状の掘削箇所における埋戻し時の転圧等に使用される機械であり、その構造上、壁際までの締固めが可能である。本論文では、薄層の締固めに適用させるように振動の方向・振幅を調整した。表 2.3-3 に使用した小型振動ローラ (1.5t 級および 2.5t 級) の主要諸元を示す。一般部および手前端部の初期転圧・本転圧は、大型振動ローラを使用して行った。表 2.3-4 に各大型振動ローラの主要諸元を示す。図 2.3-7 に大型振動ローラを示す。

表 2.3-2 試験ケース

ケース No.		1	2	3	4	5	6	7
施工層		1	2	3	4	5	6	7~10
転圧種類		転圧回数						
予備転圧	2.5t 級	2	2	—	—	—	—	—
初期転圧 (無振動)	19t 級	8	4	4	4	—	—	—
	11t 級	—	—	—	—	4	4	4
本転圧 (振動)	19t 級	6	4	4	2	—	—	—
	11t 級	—	—	—	—	6	4	4

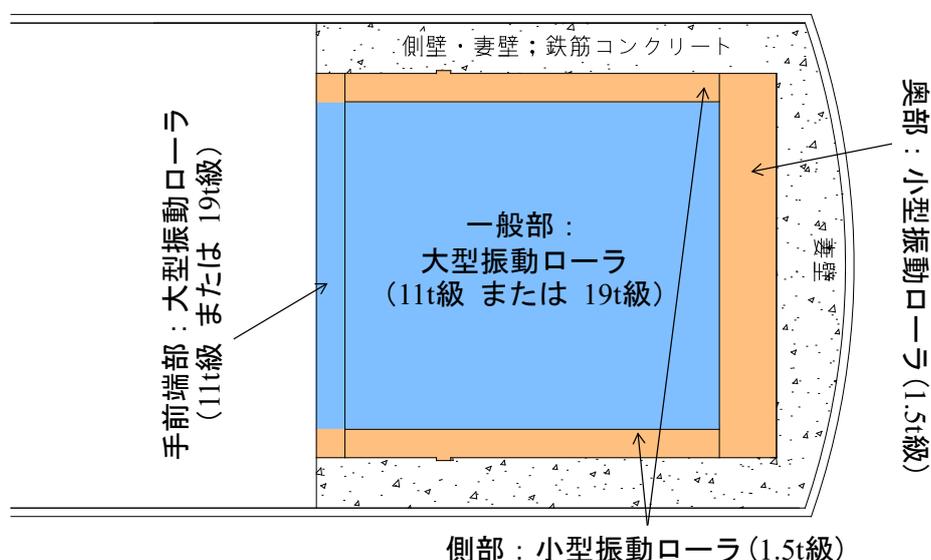


図 2.3-5 振動ローラの種類による施工箇所の分け

表 2.3-3 使用振動ローラ（1.5t 級および 2.5t 級）の主要諸元

ローラ種別	1.5t 級	2.5t 級
機体長	1,500mm	2,675mm
機体高	1,200mm	1,575mm
機体幅	610mm～850mm	1,290mm
機体質量	1,548kg	2,640kg
エンジン	空冷 2 気筒ディーゼル	空冷 2 気筒ディーゼル
速度	1.2km/h	2km/h
車輪幅	278×2～398×2	1,200mm
操作	リモートコントロール	搭乗式

表 2.3-4 大型振動ローラ（11t 級, 19t 級）の主要諸元

ローラ種別	11t 級	19t 級
機体長	5,808mm	6,250mm
機体高	2,972mm	2,910mm
機体幅	2,250mm	2,530mm
機体質量	10,950kg	19,400kg
周期	30Hz	28Hz
振幅	1.8mm	1.8mm
起振力	236kN	343kN
速度	2km/h	2km/h
車輪幅	2,130mm	2,150mm
操作	搭乗式	搭乗式



図 2.3-6 小型振動ローラ（1.5t 級）

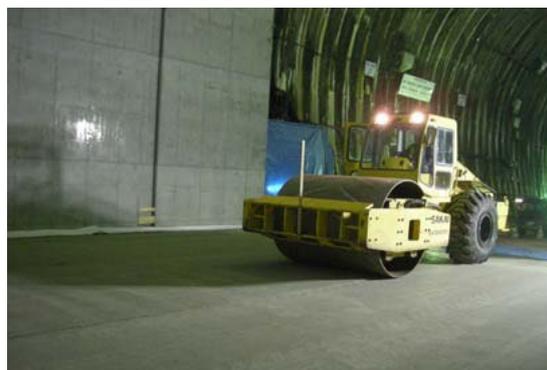


図 2.3-7 大型振動ローラ

2.3.2 側部低透水層の施工試験概要

2.3.2.1 施工システムの選定

側部低透水層の施工箇所は狭隘な空間であり、実物の処分施設では奥行き方向に100m程度となることが予想される。このような箇所では、敷均しおよび転圧時の施工箇所の幅の制限のみならず、100m程度の奥行きや約8m程度の高低差を考慮した、施工箇所への材料の供給方法も課題となる。ここで、材料の供給、材料の敷均し、転圧に使用する施工機械について説明し、これらの施工機械を組み合わせた狭隘なトレンチ状の空間における施工方法について述べる。

(1) 材料の供給方法の選定

材料の供給方法とは、敷均し箇所または敷均し機械へ材料を供給するため、最大100m程度の距離をトンネル軸方向に輸送する方法のことであり、大きく2つの方法が考えられる。1つ目の方法はトレンチ状の空間の中で行う方法であり、もう1つの方法は、図2.3-8に示すように、一旦材料をコンクリートピット上部に荷揚げし、キャリアなどの輸送機械で所定の箇所まで輸送し、敷均し箇所または敷均し機械へコンクリートピット上部から材料を供給する方法である。

トンネル軸方向の材料の移動と、コンクリートピット上部から敷均し箇所への供給は別作業にできるため、合理的な材料の供給が可能となる。そのため、本研究では、後者の方法を採用することとした。コンクリートピット上部から敷均し箇所または敷均し機械へ材料を供給するための専用機械（以下、ベントナイト供給機）を製作した。ベントナイト供給機を用いた材料供給の概念図を図2.3-9に示す。

ベントナイト供給機は、材料を受けるホッパと敷均し箇所へ鉛直方向に材料を供給するシュート、これらの2つをつなぐベルトコンベア、レール上をトンネル軸方向に移動するためのモーターによる走行装置から構成される。

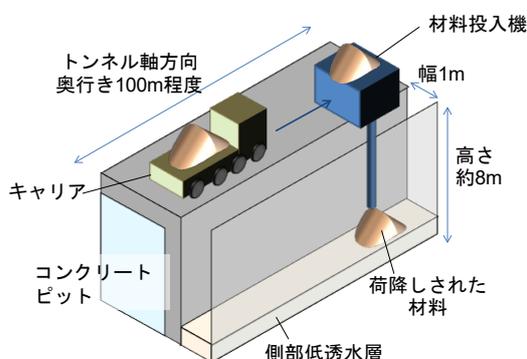


図 2.3-8 コンクリートピット上部からの材料供給方法

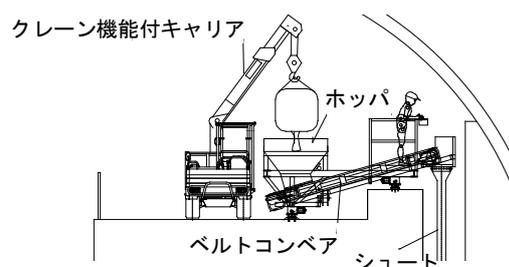


図 2.3-9 ベントナイト供給機を用いた材料供給の概要

(2) 材料の敷均し方法の選定

材料の敷均し方法は、人力による方法の他、幅 1m のトレンチ状の空間に適合した施工機械を用いる方法が考えられる。しかし、このような空間に適合した施工機械は無いのが現状である。

そこで、専用の敷均し機械（以下、ベントナイト敷均し機）を製作した。ベントナイト敷均し機は、①幅 1m という狭隘な空間に収まること、②コンクリートピット上部から供給される材料を受け取る機構を有すること、③トンネル軸方向に任意の速度で移動できること、④トンネル軸方向にある一定速度で移動しながら、横断方向に幅 1m で、均一に材料の敷均しを連続的に行うことが可能であること、⑤任意の厚さで敷均しできること、という 5 つの機能を有するものとして設計し製作した。

ベントナイト敷均し機は、アスファルトフィニッシャーと同様に、材料を受取るホッパ、材料を横断方向に送り出すスクリーオーガ、敷均し厚さを調整するため上下動できる箱型スクレーパを基本構成とする。移動方式は施工試験領域のトンネル軸方向の延長が 11m 程度と短かいため、自走機構は搭載せず、ウィンチによる牽引方式とした。均一な材料の敷均しを行うため、牽引速度とスクリーオーガの回転速度を制御できるようにした。図 2.3-10 にベントナイト敷均し機を、表 2.3-5 に機械仕様を示す。

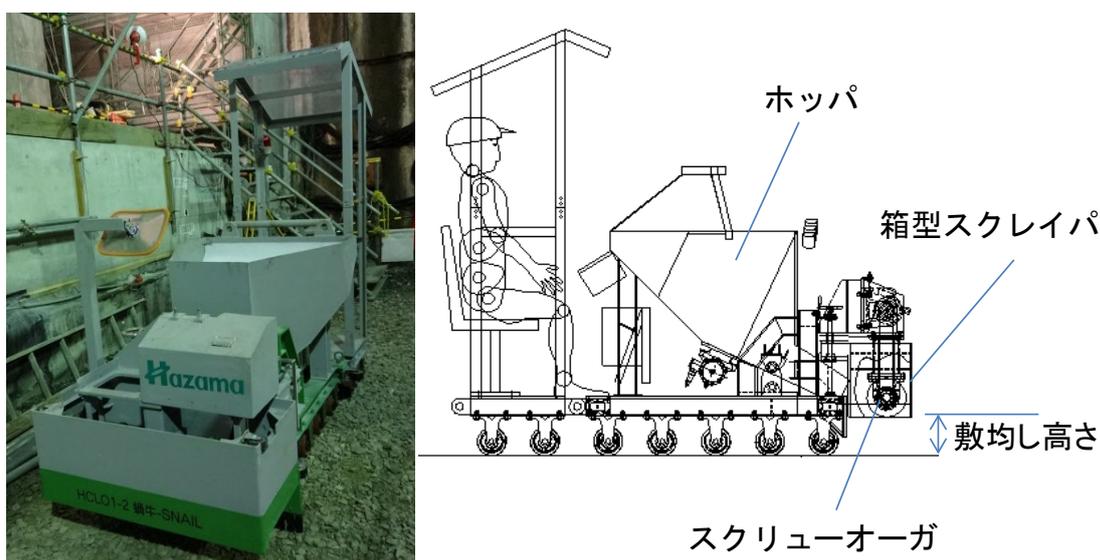


図 2.3-10 ベントナイト敷均し機

表 2.3-5 ベントナイト敷均し機の仕様

機体長	2,350mm
機体高	1,890mm
機体幅	980mm
機体質量	550kg
敷均し幅	980mm
敷均し厚	最大250mm
ウインチ牽引力	940kg
速度	1.1 ~ 3.0 m/min
最大積載量	約0.4m ³

(3) 材料の転圧に用いる機械の選定

材料の転圧に用いる機械は、底部低透水層の施工試験において、壁際の転圧に用いた実績のある小型振動ローラを用いた⁸⁾ 17)。機体幅が1m未満であり、幅1mのトレンチ状の空間に適合する。側部低透水層の施工においては、転圧幅を850mm、710mm、610mmにできるように、転輪を3種類用意した。ローラのサイド部分には防護材（クッション材）を貼付けた。

2.3.2.2 施工方法と施工フロー

これまでに、狭隘なトレンチ状の空間に適合した施工機械について説明した。ここでは、これらの施工機械を組み合わせた施工方法と施工のフローについて説明する。

図 2.3-11 に側部低透水層の施工フローを示す。側部低透水層の施工において、底部低透水層の場合と異なる点は、敷均しを行う際、先述のとおり施工機械に材料を供給する方法がコンクリートピット上部から行うことと、そのための専用の施工機械を用いることである。敷均し後の転圧は、底部低透水層と同様に、無振動で行う「初期転圧」と振動を加えながら行う「本転圧」の2種類を行った。1層当たりの仕上がり厚さは100mmを基本とした。施工手順は以下のとおりである。

- 1) 粒状ベントナイトの含水比調整を攪拌付回転容器型ミキサ¹⁸⁾を用いて行う。回転容器に自然含水比状態の粒状ベントナイトを投入し、所定の水量を添加した後混練し含水比調整する。混練後、含水比の管理目標値(21.0±2.0%)を満足しているか確認し、管理目標値を外れた場合、再調整する。
- 2) 含水比調整した粒状ベントナイトをフレキシブルコンテナに詰める。粒状ベントナイトを詰めたフレキシブルコンテナを施工箇所に運搬する。
- 3) 2t キャリアダンプ(1t 吊クレーン機能付)を用いて、コンクリートピット上に荷揚げされたフレキシブルコンテナを開封し、ベントナイト供給機のホッパに粒状ベント

ナイトを投入する。

- 4) ホッパに投入された粒状ベントナイトを，図 2.3-12 に示すようにベントナイト供給機のベルコンを用いて敷均し箇所またはベントナイト敷均し機へ供給する。ベントナイト供給機のホッパ内への粒状ベントナイトの追加投入は，ホッパ内の粒状ベントナイトがなくなった時点で行う。
- 5) 人力またはベントナイト敷均し機で，所定の厚さになるように粒状ベントナイトの敷均しを行う。
- 6) 小型振動ローラを用いて所定の転圧回数の初期転圧（無振動での転圧）を行う。
- 7) 小型振動ローラで転圧できない，手前部・妻部の端部の転圧をランマで行う。
- 8) 小型振動ローラを用いて所定の回数の本転圧（振動転圧）を行う。
- 9) 測量による施工後の体積と投入質量から算出できる乾燥密度，コアドリルで回収したコアを用いた乾燥密度測定（以下，コア法とする）により，乾燥密度を測定し管理目標値（ $1.6 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ ）を満足しているか確認する。所定の回数の転圧のみで管理目標値を外れた場合，乾燥密度を確認しながら追加で本転圧の転圧回数を増やしていくこととした。

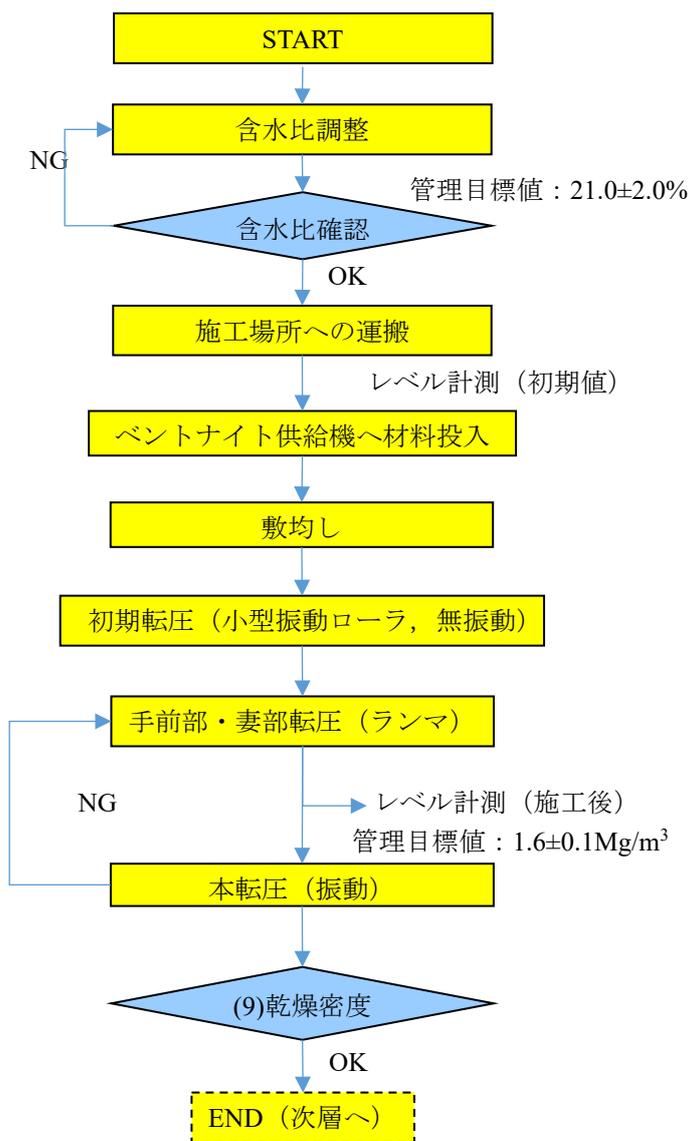


図 2.3-11 側部低透水層の施工フロー



図 2.3-12 ベントナイト敷均し機への材料の供給状況

2.3.2.3 敷均し方法

敷均しは基本的にベントナイト敷均し機を用いて行ったが、図 2.3-13 の平面図のように、坑口側の機械の乗り込み口付近は人力にて行った。また、施工面の標高が上がると、ベントナイト供給機からベントナイト敷均し機に粒状ベントナイトの供給ができなくなったので、施工高さが 6m に到達してからの敷均しも人力のみで行った。

ベントナイト敷均し機の箱型スクレーパの下端の高さが材料の敷均し厚さになるので、作業前に所定の高さに調整して固定した。箱型スクレーパ内部のスクリーオーガの回転数とウィンチの牽引速度を制御し、均一に敷均しできるようにした。ベントナイト供給機への材料投入は、ホッパーから溢れ出さないように目視で確認しながら行った。

人力で実施する場合の敷均し厚さの管理は、レベル測量により目標高さを測定し、側壁にマーキングして行った。敷均しはレーキ等を用いて行った。

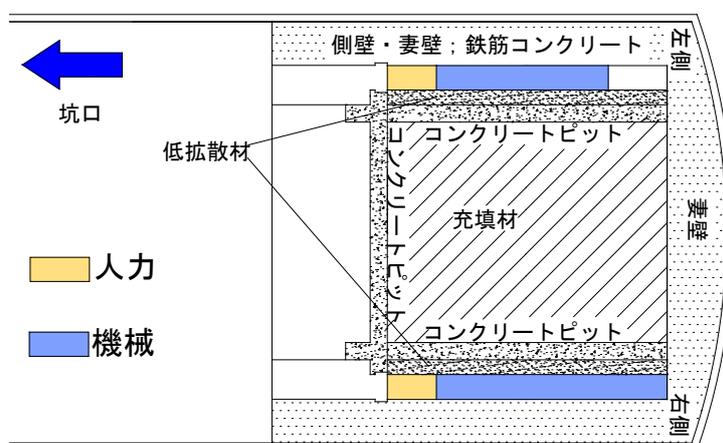


図 2.3-13 施工箇所の工法割り

2.3.2.4 転圧方法

転圧幅、敷均し厚さ等の転圧時の施工条件と仕上がり後の品質との関係について、実際に小型振動ローラを用いて施工を行い確認した。本試験で採用した小型振動ローラを用いて行われた基礎的な試験結果¹⁷⁾によると、乾燥密度の管理目標値である 1.6 Mg/m^3 は確保できるとしているが、同一層内でも鉛直方向の乾燥密度分布が生じたり、平面的な場所の違いにより転圧時の状況が変わり、仕上がり後の乾燥密度にばらつきが生じることが示されている。

本研究では、転圧時の施工条件を変化させ、施工後の品質、とりわけ乾燥密度のばらつきの程度に与える影響を把握することとした。まず転圧ローラの幅を変化させた場合の影響について調べた。次に同じ転圧幅でも敷均し厚さを変化させた場合の影響を検討した。その後、同一条件で転圧した時の乾燥密度のばらつきの程度や、平面位置の違いによる影響について検討した。

ローラ幅は 850mm, 710mm, 610mm の 3 種類で検討を行った。図 2.3-14 にローラ幅を示す。図 2.3-14 中の水色の箇所が実際に転圧を行う部分であり、黄色の箇所はローラが接地していないため、転圧されない部分である。ローラ幅が 1.0m に満たないため、また、図 2.3-14 中の黄色の箇所のように一部ローラが接地していない部分があるため、単純に往復走行をしているだけでは転圧されない部分が 1.0m 幅の中でも生じてしまう。そのため、転圧時の走行箇所（以下、走行レーンとする）を変えて転圧する必要がある。図 2.3-15～図 2.3-17 にローラ幅と走行レーンの関係を横断面図で示す。転圧幅 850mm や 710mm の場合には、走行レーンの数は 2 レーンで 1.0m 幅を不足なく転圧することが可能であるが、ローラ幅 610mm の場合は 3 レーンが必要である。

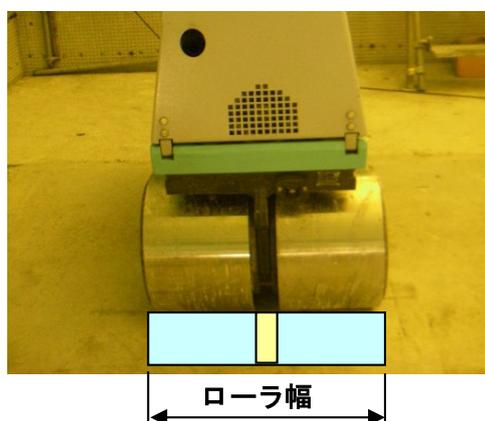


図 2.3-14 ローラ幅の概念

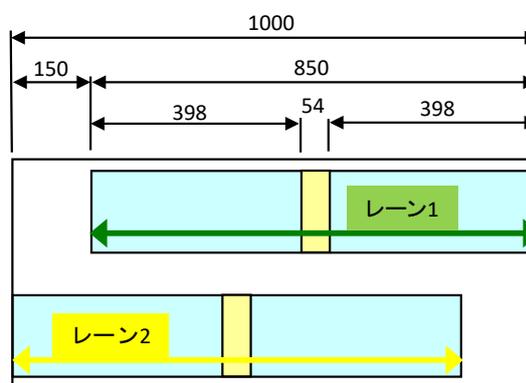


図 2.3-15 ローラ幅 850mm の走行レーン

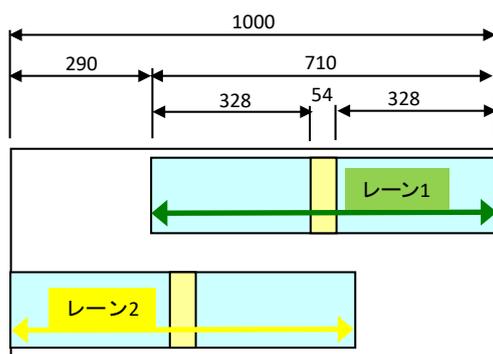


図 2.3-16 ローラ幅 710 mm の走行レーン

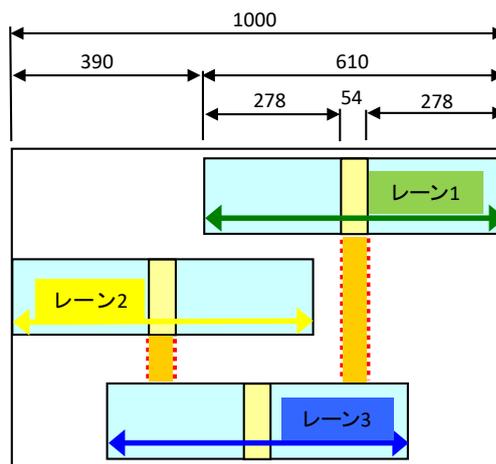


図 2.3-17 ローラ幅 610mm の走行レーン

2.3.3 施工時の品質管理方法

材料調整後、敷均し後、転圧後の各段階における品質管理を行った。各段階での確認項目と試験方法を表 2.3-6 に示す。

表 2.3-6 品質管理項目と測定方法

品質管理項目	数量	方法
納品検査		
ミルシート確認	生産ロット No.ごとに確認	シートに記載内容の確認
含水比測定	フレコン 1 袋 (1 トン) ごとに 3 点	JIS A 1203
加水調整後の品質確認		
含水比測定	バッチ毎に 3 点	JIS A 1203
出来形管理		
施工面高さ	底部：1 点/m ² 側部：3 点/m ²	レベル測量
施工面観察	適宜	目視
品質管理		
敷き均し後		
かさ密度測定	4 箇所/層	JGS 1613-2012 を参考
転圧後		
シンウォールサンプリングによる密度試験	底部：20 箇所/層 側部：6 箇所/層	コアリング後の試料に JIS A 1225 を適用
性能確認		
透水試験	底部：21 個 側部：36 個	JGS 0312
膨潤圧試験	底部：9 個 側部：21 個	JIS A 1217 を参考，変位固定
一軸圧縮試験	底部のみ，12 個	JIS A 1216
三軸圧縮試験 (UU 条件)	底部のみ，6 個	JGS 0521
平板載荷試験	底部のみ，9 個	JGS 1521

材料の敷均し完了時点での乾燥密度を確認するために、かさ密度測定を行った。測定方法は、各層において内径 150mm の鋼製円筒を測定箇所へ挿入し、この円筒内の材料をスプーン・採取ごて等で全て掬い出して試料を採取し、採取箇所の敷均し厚さの平均値をノギスにより計測し容積を計算するものである。この容積と採取した試料の質量よりかさ密度を計算し、さらにかさ密度と含水比より乾燥密度を求めた。

転圧完了後、その層からコアを採取して乾燥密度を測定した。コアドリルを用いて直径 98mm、高さ約 100mm (1層あたりの厚さ) の大きさでコアを採取した。採取したコアの質量およびノギスを用いて測定した寸法より求めた体積から湿潤密度を算出した (以下、ノギス法)。密度算出後のコアは粉砕した後に炉乾燥法によって含水比を測定し、そのコアの乾燥密度を求めた。また、一部のコアについては、同一層内でのばらつき (乾燥密度の分布) を評価するため、上下方向に 3 分割して測定した。

2.4 施工試験結果

2.4.1 底部低透水層

2.4.1.1 敷均しの結果

隣同士の敷均しレーンのオーバーラップ等により密度差が生じることが考えられたので、測定箇所については図 2.3-3 の赤丸点で示すようにレーンの中央部およびレーンの端部の合計 9 点で測定した。

測定結果を図 2.4-1 に示す。乾燥密度は $0.79\sim 0.95\text{Mg/m}^3$ 程度であり、レーンの中央部 ($0.79\sim 0.87\text{Mg/m}^3$ 程度) に比べて端部 ($0.85\sim 0.95\text{Mg/m}^3$ 程度) の方が密度は高くなった。これは材料を平坦に敷き均すスクリード (アスファルトフィニッシャーの後部に構成されている材料を敷均す部分。スクリード部には、材料を広げるためのスクリーフフィーダや材料を加熱するための加熱装置、材料を突き固めるためのバイブレータやタンパが装備される。本論文ではバイブレータやタンパを使用していない。) の内部において、材料を横断方向に移動させるスクリーフフィーダの回転数が高すぎることに伴い、スクリードの端部、すなわちレーンの端部の密度が高くなってしまったものと思われる。また、混練時に過剰に吸水してできた高含水比の粒状ベントナイトの塊を、敷均し作業時に除去することは不可能であったため、局所的に含水比が管理目標値の上限値 23% を超える箇所が発生した。密度のばらつき幅が 0.15Mg/m^3 程度であったこと、含水比が管理目標値の上限値 23% を超える箇所ができたことが転圧後の乾燥密度にどの程度影響があるかは、後述の「2.4.1.2 (4)」項にて検討する。

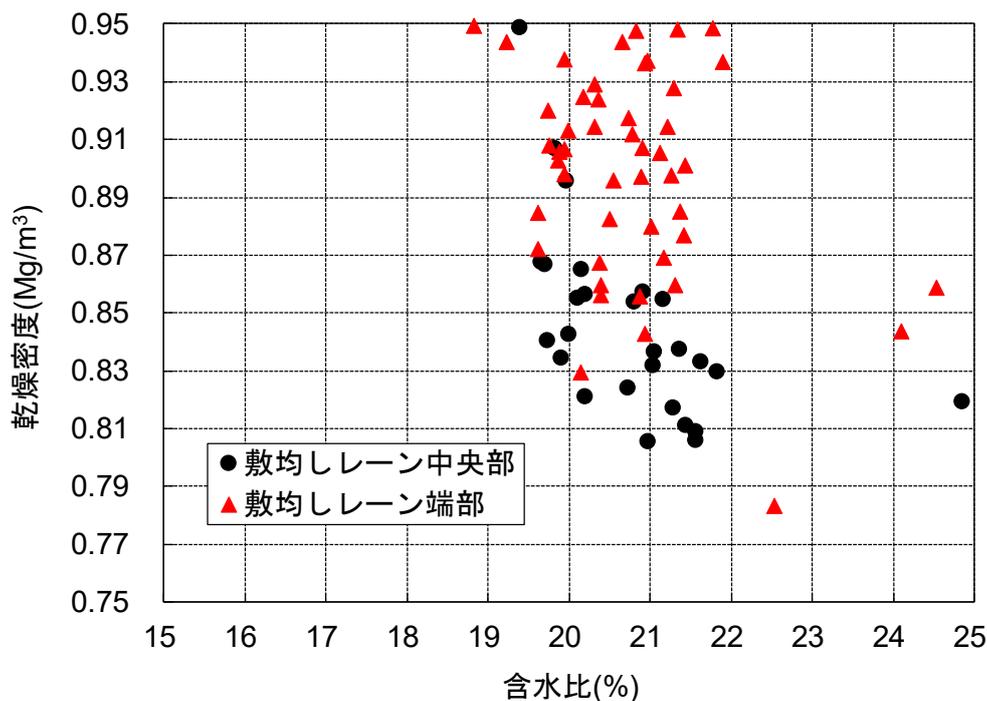


図 2.4-1 敷均し後の乾燥密度の測定結果

2.4.1.2 転圧の結果

(1) 乾燥密度による仕上がりの評価

各層のコアの乾燥密度の測定結果の平均値を図 2.4-2 に示す。各層から採取したコアの乾燥密度の平均値はいずれの層でも管理目標値を満足し、19t 級大型振動ローラによる施工層の密度は 11t 級大型振動ローラによる施工層より大きいという結果になった。

19t 級大型振動ローラを用いた 1 層目～4 層目では 2.5t 級小型振動ローラによる予備転圧の有無や大型振動ローラによる無振動転圧である初期転圧の転圧回数の違いによる有意な差は見られなかった。3 層目と 4 層目で比較すると、転圧回数と達成密度の間に相関がみられ、転圧回数の少ない 4 層目の方が密度は小さい結果となったが、それでも十分に管理目標を満足する結果であった。

1 層目～4 層目の結果より、11t 級大型振動ローラを用いた 5、6 層目のケースでは 2.5t 級小型振動ローラによる予備転圧は行わないこととし、また無振動転圧による初期転圧の回数は 4 回とした。5、6 層目では 11t 級大型振動ローラによる本転圧（振動転圧）回数を変えて試験を行ったが、本転圧の回数が 4 回でも施工管理目標を満足することが分かった。そこで、7 層目以降では同一の転圧回数（無振動 4 回、振動 4 回）で施工を実施したが、いずれの層においても管理目標値を満足する結果を得た。

なお、5、6 層目の仕上り密度は 7～10 層目の密度より高い値となったが、5、6 層目の密度が相対的に大きい原因としては、使用材料の含水比の影響が考えられる。5、6 層目で使

用したベントナイトの含水比の平均値は 20.0%で 7 層目～10 層目 (20.7%～20.8%) より低く、使用した材料に差があった。

7 層目～10 層目でのコアの乾燥密度は管理目標値である 1.50～1.70Mg/m³ の間に分布し、その中でも 1.55～1.65Mg/m³ の間での分布割合が大きくなった。同一転圧回数で施工しても、乾燥密度はこの程度のばらつきが生じることを確認できた。

また、含水比が管理目標値の上限値 (23%) を超える箇所でも乾燥密度は 1.50Mg/m³ を超えることを確認したため、含水比が多少高くても転圧後の乾燥密度に与える影響は小さいと考えられる。図 2.4-3 に 1 層目～10 層目での各層の含水比と乾燥密度の関係を示す。同図には、図 2.2-2 に示した締固め曲線のうち、締固めエネルギーが 4.5Ec のものを併記した。同図より、本研究での条件では締固めエネルギーは 4.5Ec 相当の施工ができることが明らかとなった。

各層ごとにまとめたコアの乾燥密度のヒストグラムを図 2.4-4 に示す。全体的に管理目標値に対して高めの仕上り密度となったが、平均値は 1.64 Mg/m³ で管理目標値の範囲内に入った。ばらつきについては、標準偏差が 0.039 Mg/m³、分布範囲が 0.220 Mg/m³ となった。下限側は管理目標値を下回らなかった。上限側は管理目標値を全体の 4.6%程度の度数が超過し、最大値は 1.73 Mg/m³ であった。管理目標値は各仕上がり層全体に対する目標であり、図 2.4-4 に示すように、局所的な測定値であるコアの乾燥密度は一部この管理目標値を外れる値が存在はするものの、各施工層全体としての平均値は図 2.4-2 に示したように満足する結果が得られた。

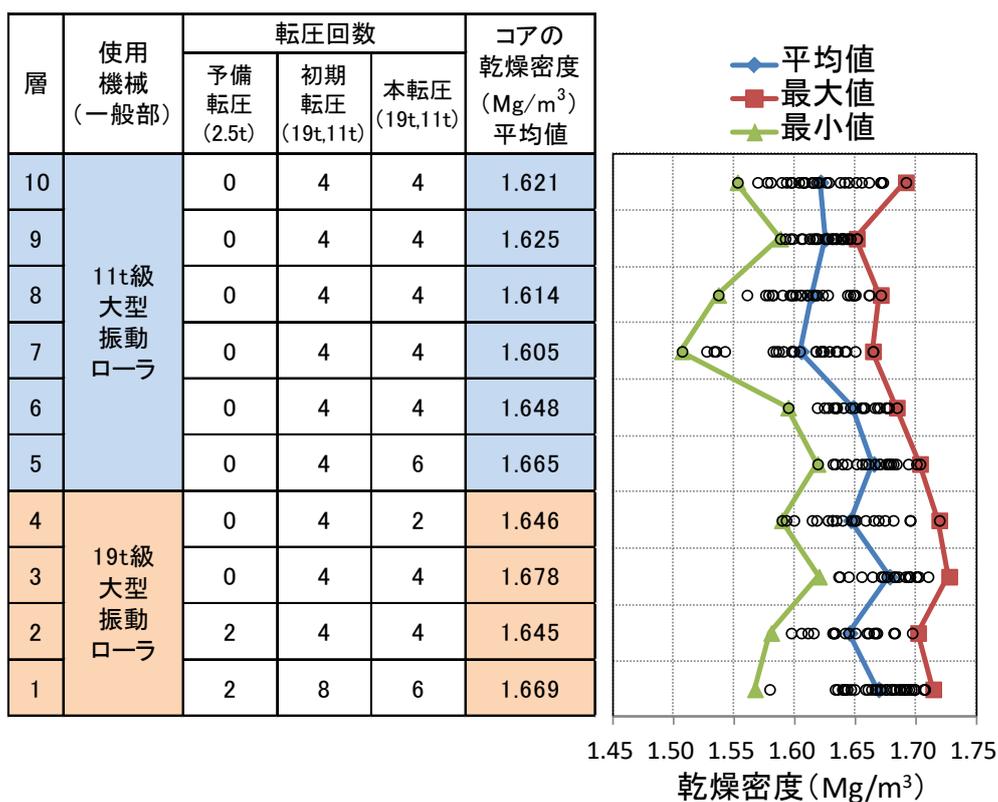


図 2.4-2 各層における仕上り乾燥密度と転圧回数の関係

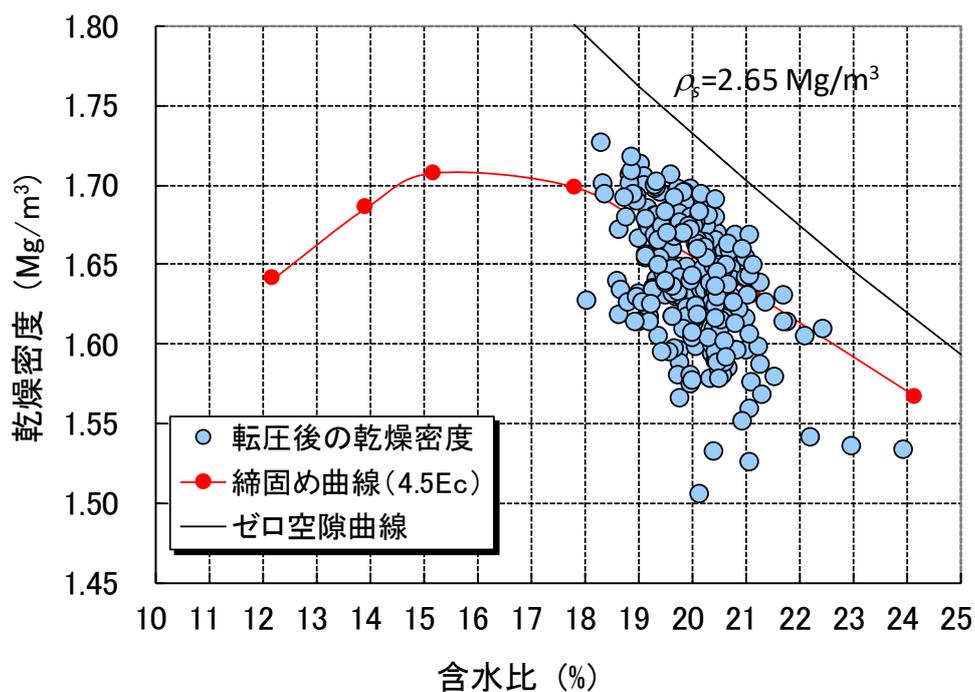


図 2.4-3 各層における採取コアの含水比と乾燥密度との関係

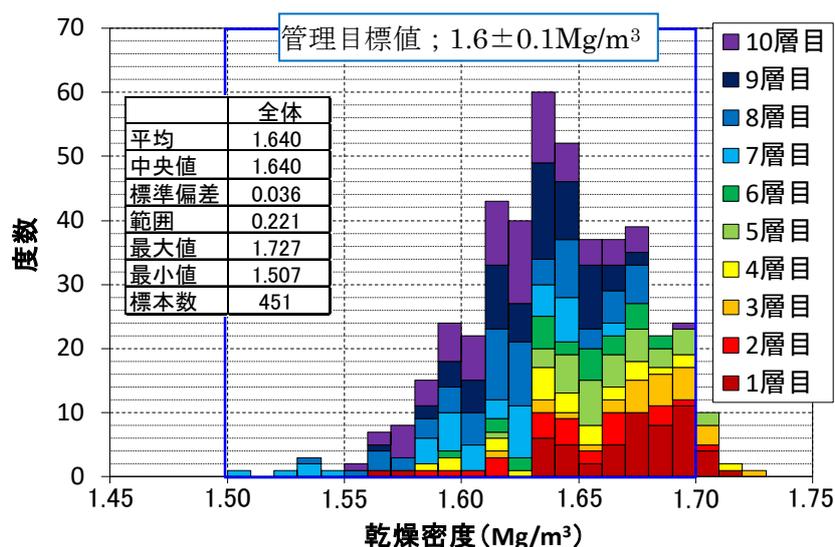


図 2.4-4 コアの乾燥密度のヒストグラム

(2) 乾燥密度の分布の評価（層内鉛直方向）

図 2.4-5 に厚さ約 10cm の各層を上下方向に 3 分割したコアの乾燥密度の測定結果を示す。上部は振動ローラに接する部分、下部は前施工層に接する部分であり、その中間部分を中部とした。

上部、中部、下部それぞれの平均値は 1.67 Mg/m³、1.64 Mg/m³、1.61Mg/m³であった。相対的に上部の乾燥密度は高めに、下部の方は低めに分布する結果となり、同一層内でも乾燥密度の分布が生じる結果となった。上部の一部（17 個）と下部の一部（4 個）で管理目標値を外れる場合があったが、これらは全測定データの 4.1%であった。全体での密度の分布範囲は 1.44～1.73Mg/m³、平均値は 1.64Mg/m³であった。3 分割したコアの乾燥密度の平均値（1.64Mg/m³）は、分割せずに測定したコアの乾燥密度の平均値（1.64Mg/m³）とほぼ整合する結果となった。

	全体	上部	中部	下部
平均	1.637	1.665	1.639	1.606
中央値	1.641	1.664	1.637	1.613
標準偏差	0.043	0.027	0.031	0.047
範囲	0.293	0.130	0.148	0.255
最大値	1.730	1.730	1.701	1.692
最小値	1.437	1.600	1.553	1.437
標本数	512	171	171	170

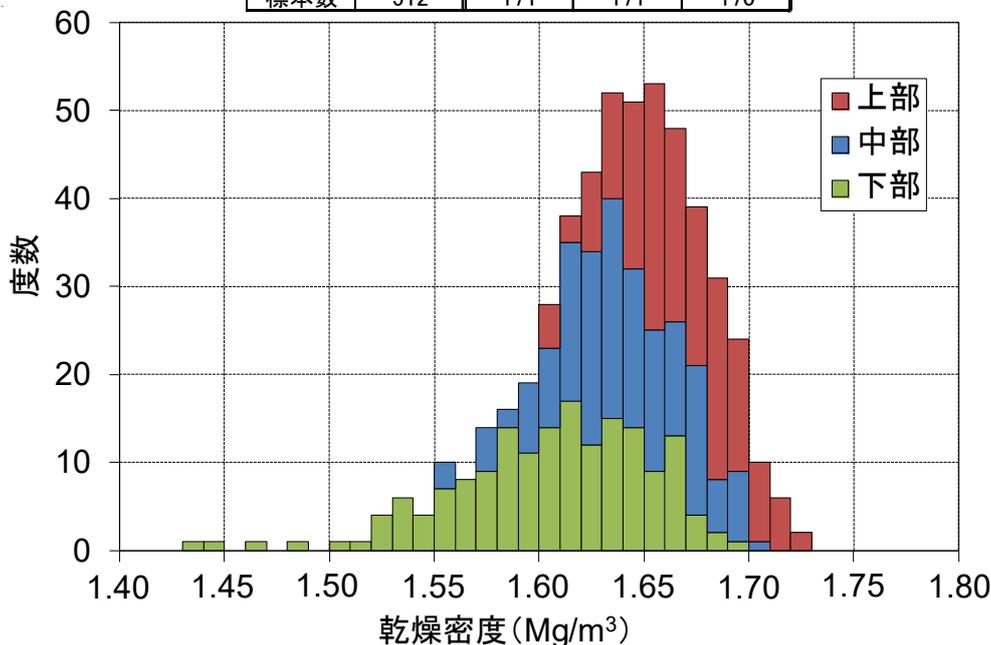


図 2.4-5 3分割コアの乾燥密度の分布

(3) 乾燥密度の分布の評価（平面的な転圧条件の違いによる影響）

図 2.3-5 に示した一般部に加え、壁際の部分および転圧時にオーバーラップした部分等、平面位置が異なれば転圧条件も異なると考えられる。図 2.4-6 に図 2.4-4 のデータを平面的な位置の違いによる転圧条件ごとにまとめたものを示す。コーナー部とは側壁と妻壁の2面が壁の角部分であり、壁際とは側壁際部分である。ラップ箇所とは一般部の転圧時に締固め残しがないように 300mm 程度オーバーラップさせた部分である。一般部よりもラップ箇所の方が相対的に乾燥密度が高くなる傾向が見られるが、その差異は小さいため転圧時にオーバーラップさせることの影響は少ないと推察される。壁際やコーナー部は転圧しにくい箇所であるが、1.57~1.62Mg/m³の範囲で施工可能であり、管理目標値を満足することを確認した。

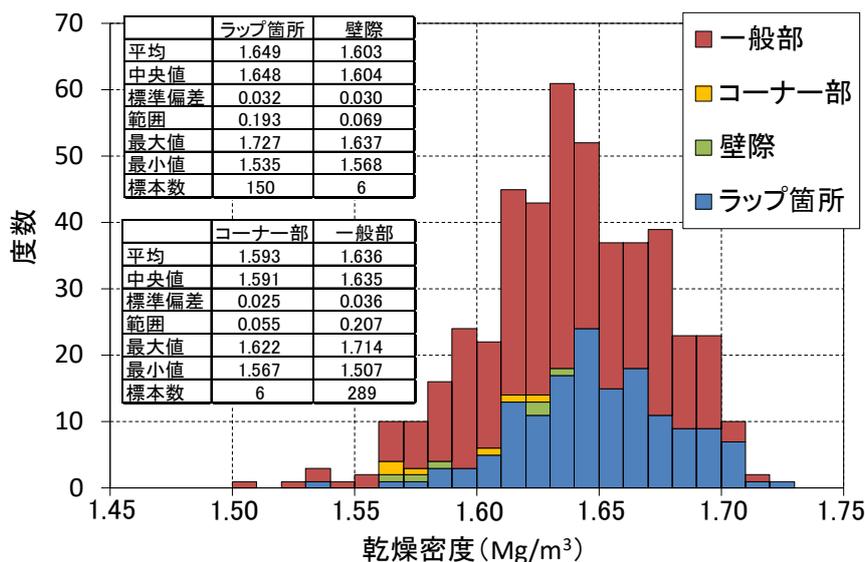


図 2.4-6 乾燥密度の平面方向の分布

(4) 敷均しの精度が与える影響の評価

図 2.3-3 に示したとおり、大型フィニッシャーによる敷均しレーンの端部（敷均し端部）とレーンの中央部（敷均し中央部）では、敷均し後の状態での乾燥密度に 0.15Mg/m^3 程度の差が生じた。この影響を確認するため、敷均し端部と敷均し中央部における転圧後の乾燥密度を測定した。図 2.4-7 に敷均し端部および中央部の測定結果を示す。

敷均し後の乾燥密度は、敷均し中央部の方が敷均し端部より密度は高くなっているが、転圧後の乾燥密度の差は敷均し後の状態での乾燥密度に比べて平均値で 0.02Mg/m^3 程度に低くなっていることが確認された。同一の転圧機械を用いて同じ回数で転圧した場合、転圧面に与えられる締固めエネルギーがほぼ一定になると考えられるので、転圧後に到達する乾燥密度はある一定値に収束すると考えられる。敷均し時の乾燥密度差は、仕上がり表面の高低差（表面の不陸）に影響した。すなわち、今回の敷均しの精度であれば、転圧後の乾燥密度のばらつきに与える影響は小さいと考えられる。

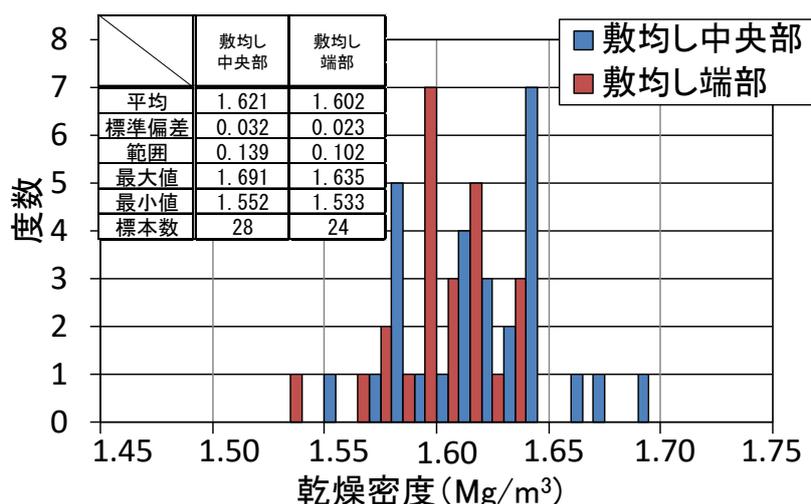


図 2.4-7 敷均し端部および中央部の転圧後の乾燥密度の分布

2.4.2 側部低透水層

2.4.2.1 敷均しの結果

敷均し完了時点での乾燥密度を確認するためにかさ密度測定を行った。測定箇所はベントナイト敷均し機で行った箇所と人力で行った箇所から、1層あたり4点程度ランダムに採取した。測定結果を図 2.4-8 に示す。凡例の「人力」は敷均しを人力で行った箇所にて、「機械」はベントナイト敷均し機で行った箇所にて測定したデータであることを示す。全体の乾燥密度は 0.78~0.92 Mg/m³ の間で分布し、機械で 0.78~0.89 Mg/m³、人力で 0.80~0.92 Mg/m³ の間で分布した。分布幅は機械で 0.11 Mg/m³、人力で 0.13 Mg/m³ で同程度あり、方法によらず同じようにはばらつく結果となった。ただし、人力（平均値；0.86Mg/m³）に比べて機械（平均値；0.82Mg/m³）の方が相対的に密度は低くなった。これは、フレキシブルコンテナ内で粒子状の材料同士が密着した状態（団粒状）になっていたところを、機械で敷均しを行うことにより材料が良くほぐれた状態となり、かさ密度が低くなったためであると考えられる。人力にて敷均しを行った箇所では、団粒状のままの箇所が残り、相対的にかさ密度が高くなったと考えられる。また、密度のばらつきは機械による敷均しの方が若干ではあるが少なくなっていた。

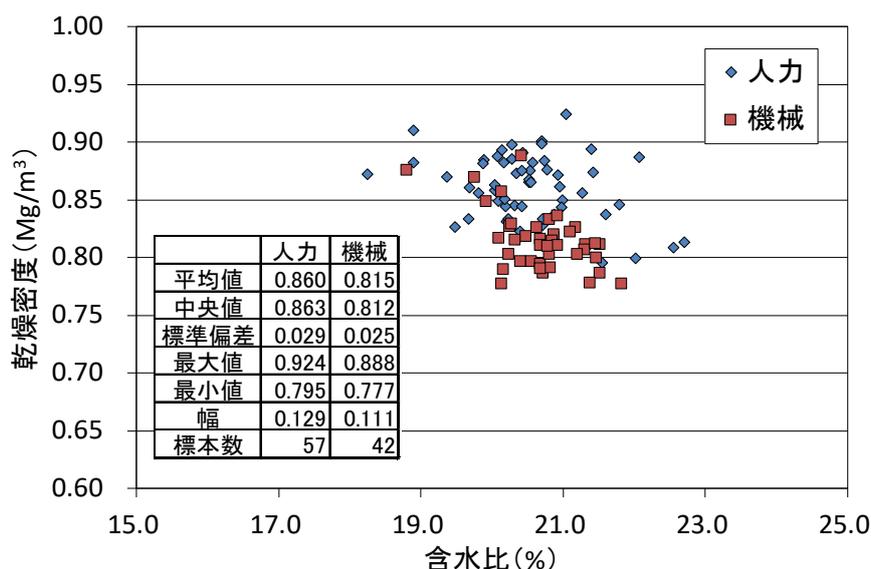


図 2.4-8 敷均し後の乾燥密度と含水比の関係

2.4.2.2 転圧の結果

(1) 転圧ローラの幅が施工後の乾燥密度に与える影響

各ローラ幅で転圧した後、コア法で求めた乾燥密度を比較した結果を図 2.4-9 に示す。比較は敷均し厚さを 200mm、転圧回数を 1 走行レーンあたり 8 回（4 往復）という条件で行った。すなわち、ローラ幅 610mm では 4×3 往復、ローラ幅 710mm と 850mm では 4×2 往復の転圧を行っている。コア法による乾燥密度の測定は、各層 6 か所を測定しているが、図 2.4-9 にはこの 6 か所の平均値を用いている。いずれのローラ幅でも、乾燥密度の管理目標値 $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ を満足したが、ローラ幅が大きくなると各層の乾燥密度の平均値のばらつきが大きくなる傾向がみられ、ローラ幅が 610mm と狭くレーン数が増えると、ばらつきが小さくなった。各ローラ幅での全平均値を比較すると、ローラ幅 610mm と 710mm では、乾燥密度はほとんど変わらなかった。そのため、乾燥密度のばらつきは大きくなるものの、走行レーン数が少ない分、710mm がより効率的といえる。710mm と 850mm では、走行レーン数は同じであるが、乾燥密度の全平均値は 710mm の方が高かった。次項では、走行レーン数が 2 レーンであるローラ幅 710mm と 850mm の二つの場合について、敷均し厚さの違いの影響について検討する。

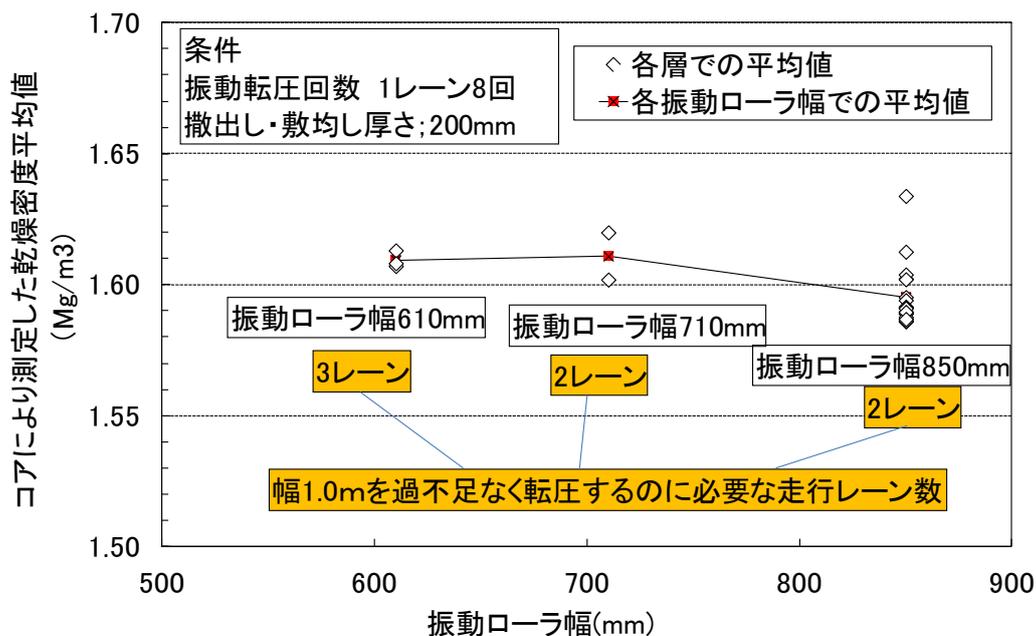


図 2.4-9 各ローラ幅で転圧した後の乾燥密度

(2) 敷均し厚さによる施工後の乾燥密度のばらつきの状況

敷均し厚さを 150mm, 200mm, 250mm, ローラ幅 710mm, 850mm で転圧した結果を図 2.4-10 および図 2.4-11 に示す。転圧回数は、管理目標値である $1.60 \pm 0.1 \text{Mg/m}^3$ を満足できる回数とし、ローラ幅 710mm の場合、敷均し厚さ 150mm の時には 4 回、200mm の時は 6 回、250mm の場合は 10 回、ローラ幅 850mm の場合、敷均し厚さによらず全て 8 回であった。図 2.4-10 にローラ幅 710mm で転圧した場合の、図 2.4-11 にローラ幅 850mm で転圧した場合の乾燥密度と含水比の関係を、それぞれ示す。乾燥密度測定はコア法で求めた。同一層内の深さ方向の密度分布とローラ幅の関係を調べるため、回収したコアを深さ方向に 3 等分（ローラ幅 710mm, 敷均し厚さ 150mm のケースは 2 等分）して乾燥密度を測定した。図中の「上部」「中部」「下部」のうち、「上部」は転圧ローラと接する表面、「下部」は前施工層と接する底の部分であり、「中部」はその中間部分である。同一層内でも、転圧ローラと接する表面部分の乾燥密度が高く、底の部分が小さい傾向となった。このような同一層内の密度分布の傾向は、ローラ幅、敷均し厚さの影響を受ける結果となった。

図 2.4-10 および図 2.4-11 を比較すると、ローラ幅 710mm の場合の方が同一層内での密度分布が低くなる傾向となった。また、敷均し厚さが大きくなると、同一層内での密度差も大きくなる傾向がみられた。

これは転圧ローラの接地圧と締固めエネルギーの到達深さの関係が影響していると考えられる。ローラ幅が狭ければ接地圧が高くなるので、「狭く深く」転圧することが可能であり、転圧によって与えられる締固めエネルギーは深い部分にも到達するものと考えられる。また、敷均し厚さが薄ければ、表面部分から底の部分まで締固めエネルギーが到達しやすく

なる。一方、転圧ローラから転圧箇所には与えられる締固めエネルギーはその転圧ローラの施工能力により決まり、上限値があるので、転圧後の乾燥密度もある値以上にはならず漸近する。転圧中の同一層内の深い部分もこの上限となる乾燥密度に漸近するものと考えられ、結局、転圧回数を増やしても最大の乾燥密度の値が大きくなり、層内の密度差が小さくなっていくものと考えられる。接地圧が十分でなかったり、層厚が大きい場合、同一層内でも底の部分にまで締め固めエネルギーが到達せず、転圧回数を増やしても底に近い部分は上限となる乾燥密度まで到達することができないものと考えられる。

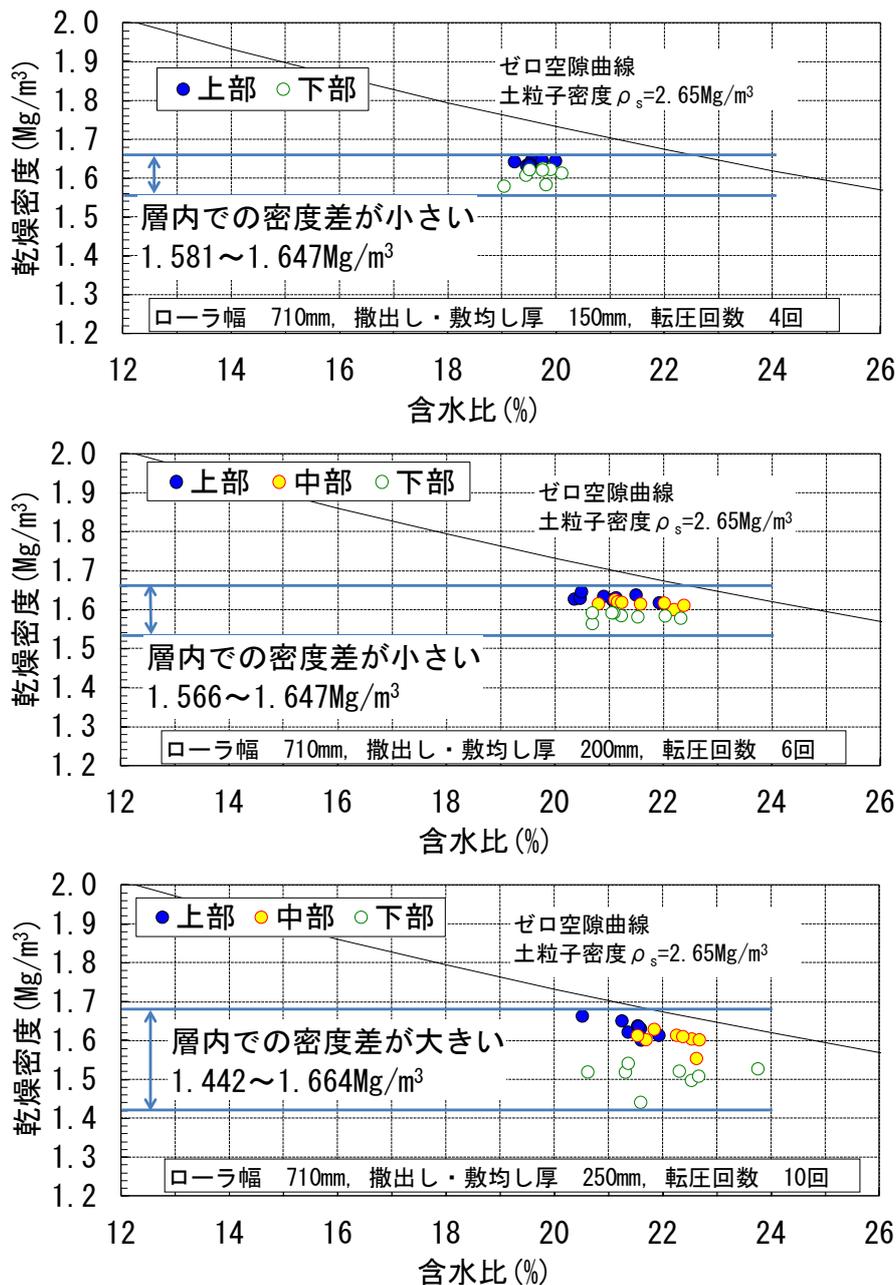


図 2.4-10 層内の乾燥密度の分布図 (ローラ幅 710mm)

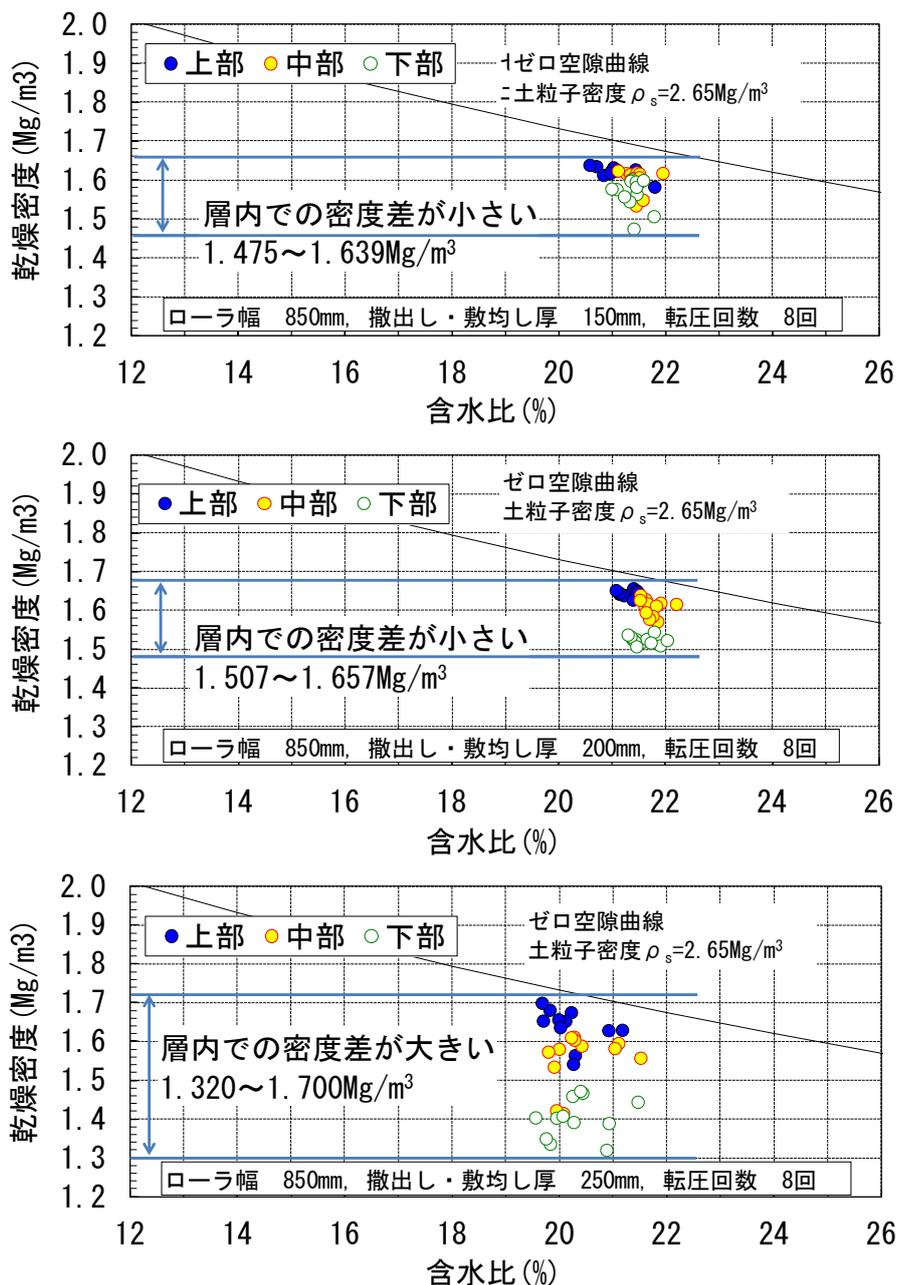


図 2.4-11 層内の乾燥密度の分布図 (ローラ幅 850mm)

ここで、「転圧ローラから転圧箇所には与えられる締固めエネルギーはその転圧ローラの施工能力により決まり、上限値があるので、転圧後の乾燥密度もある値以上にはならず漸近する」ということを図 2.4-12 に示す。図 2.4-12 は乾燥密度と転圧回数との関係である。図 2.4-12 の乾燥密度は、レベル測量による施工後の体積と投入質量から算出したものであり、その層の平均的な乾燥密度を求めている。転圧回数が大きくなるにしたがい、乾燥密度も大きくなるが、ある値(上限値となる乾燥密度)に漸近していく傾向がみられる。このような

傾向からも裏付けられるように、接地圧と締めエネルギーの到達深さの影響により、層内での乾燥密度差が生じるものと考えられる。

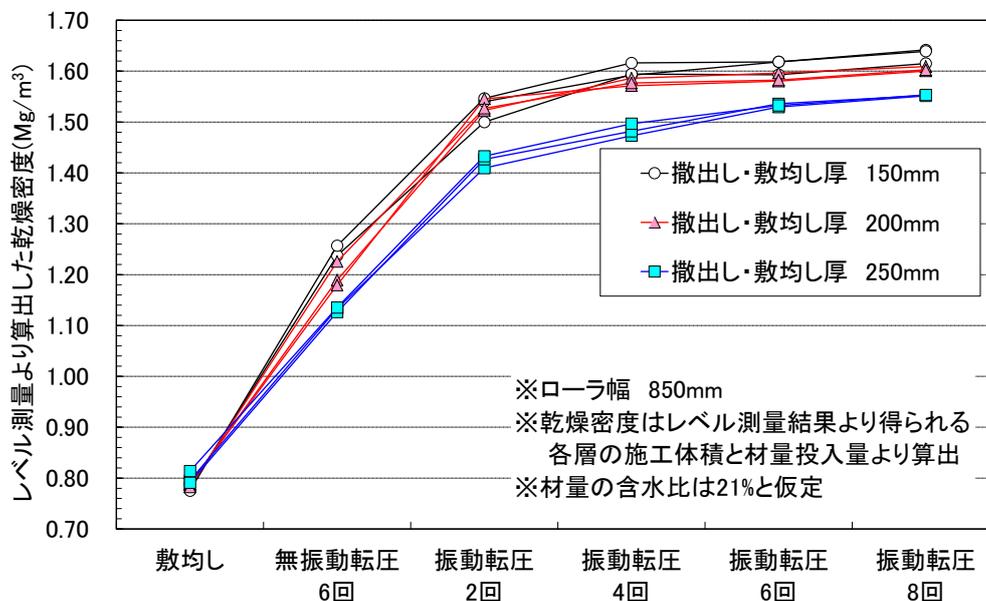


図 2.4-12 転圧回数と乾燥密度の関係 (ローラ幅 850mm)

(3) 同一条件で転圧した後の乾燥密度のばらつきの状況

管理目標値を満足することができる転圧回数を把握した後、ローラ幅、敷均し厚さ、転圧回数の条件を一定とし、複数の層を施工した時の乾燥密度のばらつきの状況を確認した。

図 2.4-13 にコア法で求めた乾燥密度と含水比の関係を示す。敷均し厚さは 200mm、ローラ幅と転圧回数は 850mm の場合は 10 回と 8 回、710mm の場合は 6 回と 4 回の、計 4 ケースとした。

各ケースとも、管理目標値である $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ を満足している。分布幅は管理目標値の幅よりも狭く 0.1 Mg/m^3 程度 ($\pm 0.05 \text{ Mg/m}^3$ 程度) であった。さらに、ローラ幅が 850mm のケースよりは 710mm のケースの方が若干ではあるが、この分布幅は小さくなった。また、転圧回数の違いによる差異はほとんどみられなかった。

含水比と乾燥密度の関係は、締め曲線に沿うように分布することが予測されたので、締めエネルギーを変えながら突固めによる土の締め試験 (以下、室内締め試験) を実施して確認した。図 2.4-14 に室内締め試験と施工試験結果との比較を、含水比と乾燥密度の関係を用いて示す。室内締め試験は $1E_c$ 、 $4.5E_c$ 、 $15E_c$ 相当 ($1E_c \approx 550 \text{ kJ/m}^3$) のエネルギーで締めた結果を、施工試験結果の代表例として、ローラ幅 710mm、敷均し厚さ 200mm、転圧回数 6 回で転圧したケースのコア法による乾燥密度を示した。施工試験結果は、含水比が小さくなると乾燥密度は大きくなるように、あるばらつきの幅を持って締めエネルギー $4.5E_c$ 相当の締め曲線に沿うような形で分布していることが確認できた。

第2章 中深度処分における低透水層の施工と施工管理

本研究で採用した施工方法は、室内締固め試験における締固めエネルギーは 4.5Ec に相当すると考えられ、前節で示したとおり乾燥密度はこの締固めエネルギーに応じた上限値に漸近すると考えられる。

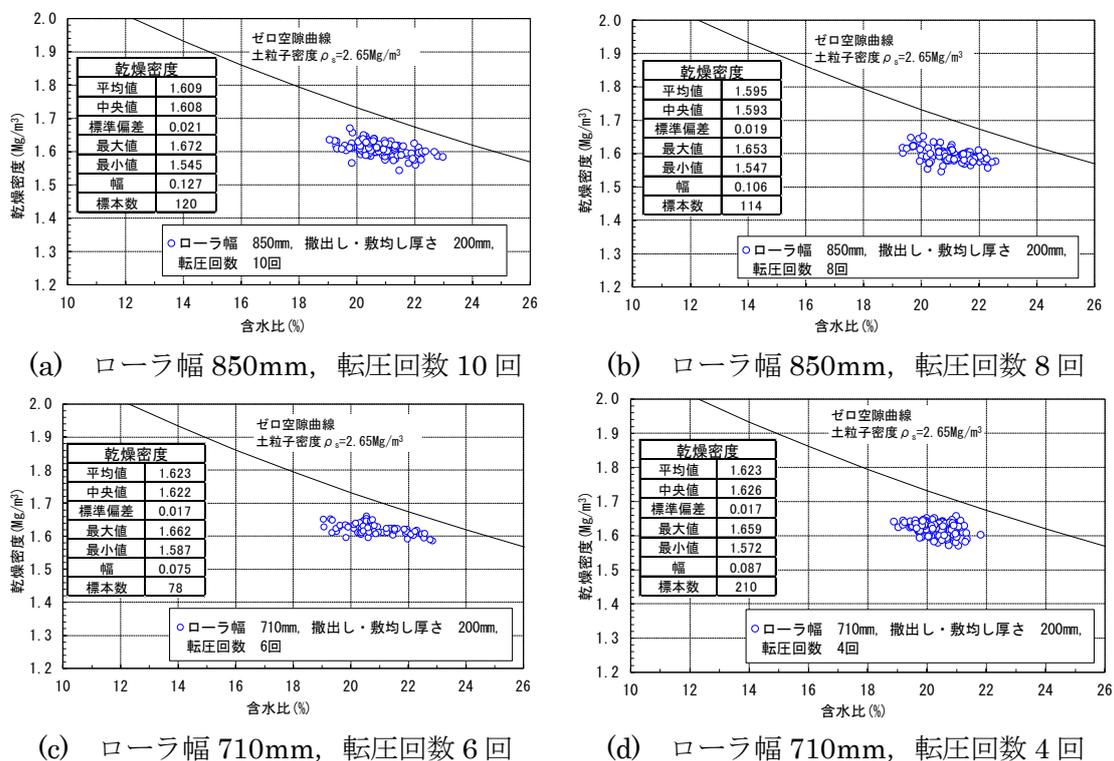


図 2.4-13 含水比と乾燥密度の関係

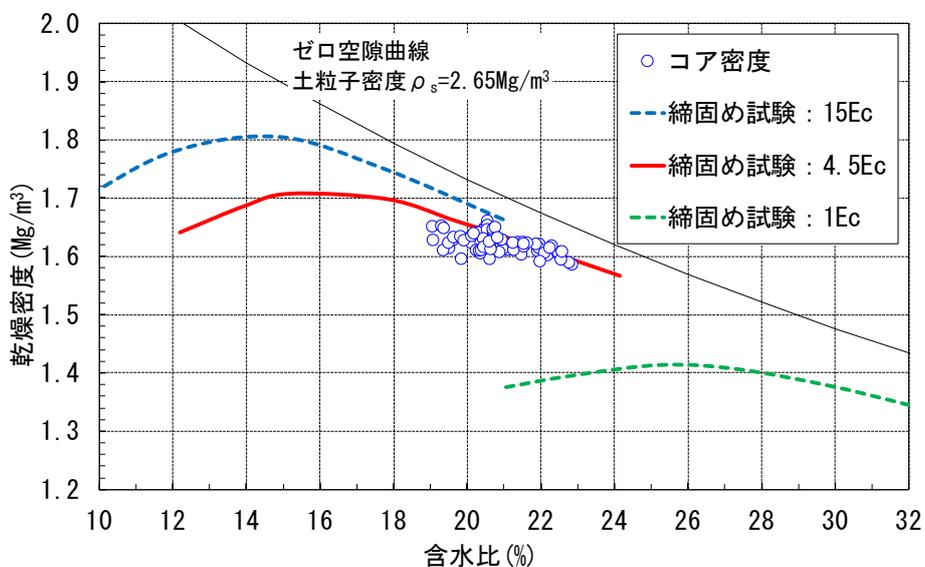


図 2.4-14 締固め曲線と施工試験の比較

(4) 平面位置の違いによる影響

走行レーンに沿う方向では、走行スピードが一定であれば転圧状況に違いが生じることは少ないと考えられるため、本節ではその影響は考慮しない。走行レーンと直行する横断方向では、走行レーンを変更させる時に生じる、規定回数以上に転圧をしているオーバーラップ箇所と壁際とでは、転圧状況が異なることが予想されるので平面位置の違いによる影響は横断方向で異なる箇所から採取したコアを用いて乾燥密度の違いにより検討することとした。

図 2.4-15 に 3 分割したコアを用いて測定した含水比と乾燥密度の関係を示す。転圧時の条件は、敷均し厚さは 200mm、ローラ幅と転圧回数は 850mm の場合は 10 回と 8 回、710mm の場合は 6 回と 4 回の計 4 ケースである。図中の「中心線」とは、壁際から 0.5m の箇所から、「壁際」とは壁際から採取したコアを採取して測定した結果であり、「上部」「中部」「下部」とは、図 2.4-7 と同様に、「上部」は転圧ローラと接する表面、「下部」は前施工層と接する底の部分であり、「中部」はその中間部分である。

「上部」「中部」「下部」の順に乾燥密度が大きくなるのは図 2.4-10 と同様の結果であるが、横断方向の平面位置の違いによる差がみられないという結果となった。走行レーンを変えることによって、幅 1.0m の転圧箇所に満遍なく締固めエネルギーが到達し、その締固めエネルギーに応じた乾燥密度の上限値に漸近していることが分かる。

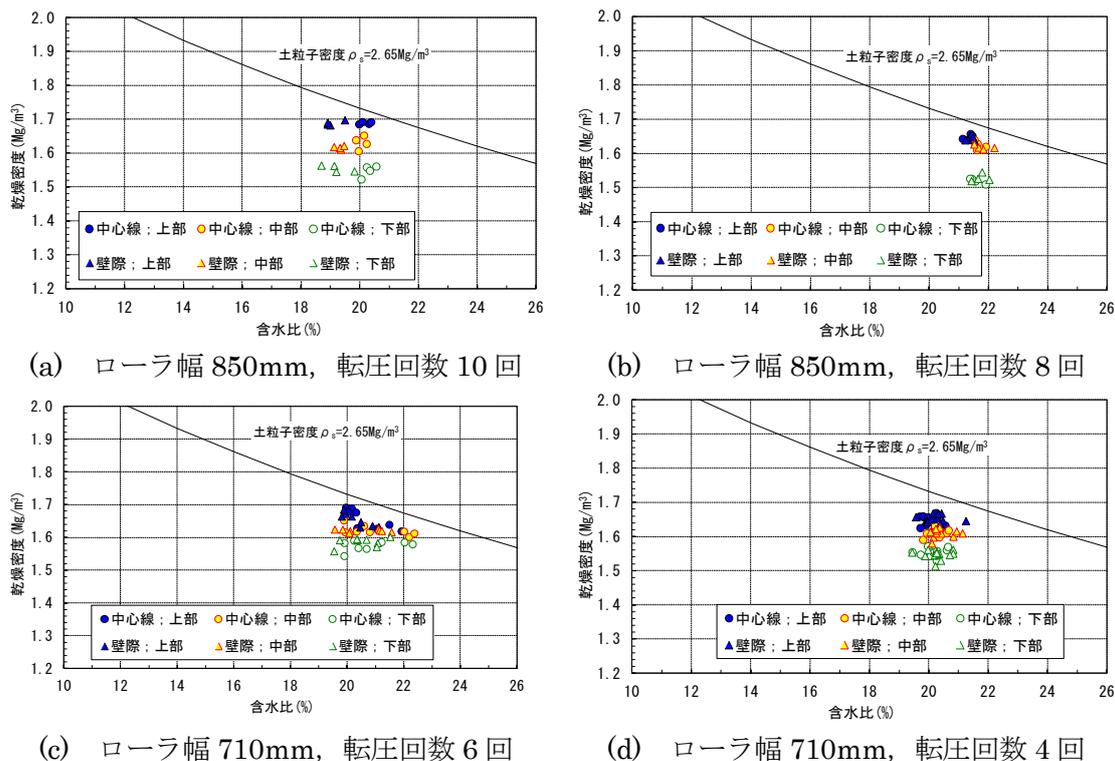


図 2.4-15 3 分割コアを用いた含水比と乾燥密度の関係 (横断方向の違いによる影響)

2.4.3 地下空洞内の環境による施工への影響

底部低透水層および側部低透水層の施工時における地下空洞内の環境の記録のうち地下空洞内の気温の経時変化を図 2.4-16¹⁹⁾に、湿度の経時変化を図 2.4-17¹⁹⁾にそれぞれ示す。地下空洞内の気温は8月の20℃前後をピークとして2月~3月に10℃を下回る最低気温を周期的に繰り返す状況となっている。湿度は春季と夏季はほぼ80~100%と高い湿度が連続し、秋季と冬季に40~60%程度まで低い湿度が連続することを周期的に繰り返す傾向となっている。

施工期間は底部低透水層の大部分を夏季に、側部低透水層は秋季と冬季に実施した。気温が高いと転圧後の乾燥密度が高くなるなどの、施工品質に対する気温と湿度の直接的な影響はほとんど見られなかった。また、湿度が高くなることで転圧ローラの鉄輪に敷き均した材料が付着するような不具合も発生しなかった。

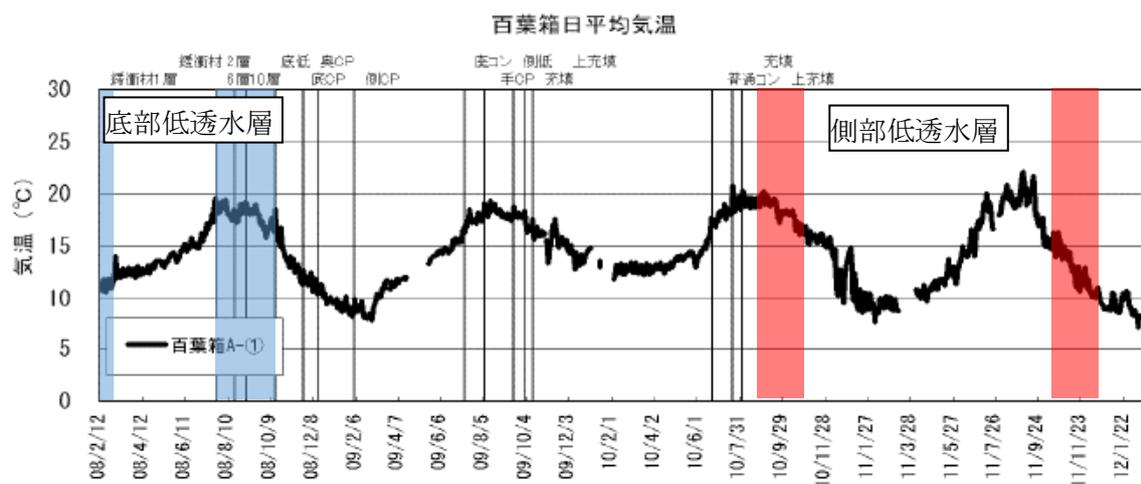


図 2.4-16 地下空洞内の気温の経時変化 (引用文献¹⁹⁾に加筆)

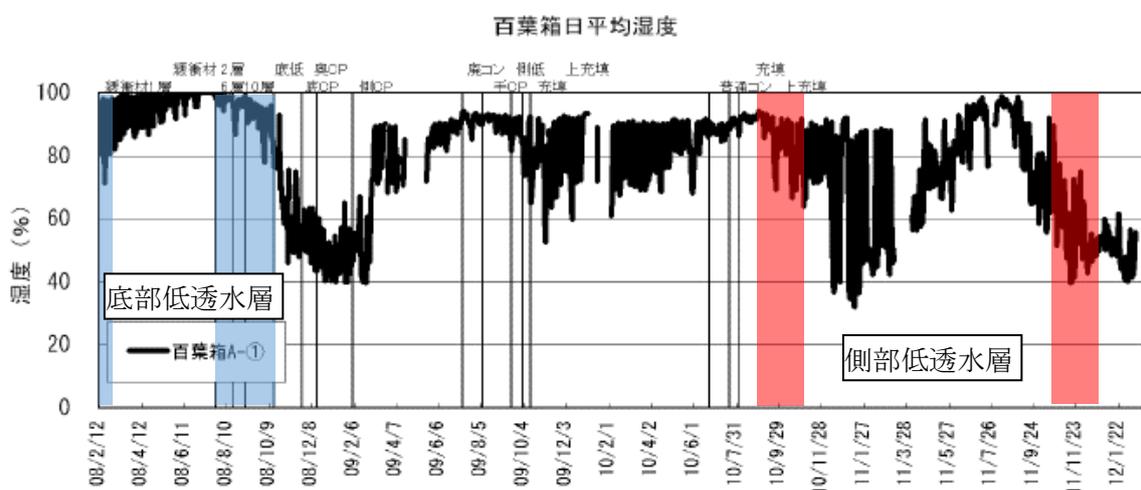


図 2.4-17 地下空洞内の湿度の経時変化 (引用文献¹⁹⁾に加筆)

しかし、地下空洞内特有の環境要因として、地下水が空洞天端から滴水となって落ちてくることや、夏季は湿度が高いためコンクリートの壁面や天井のライナーが結露することで同じく滴水が落ちてくる影響を受けた。特にコンクリートの壁際は結露下水が流下することで転圧後の低透水層の壁際の表面の一部の含水比が上昇した²⁰⁾。しかしながら、その深さ方向の影響範囲は表面から10mm程度であり、次層の施工前にスコップなどで撤去することで対応している²⁰⁾。

天井からの滴水も同様に低透水層の表面にスポット的に高含水比の部分を作っていた。含水比が高くなる範囲は表面から10mm以内の浅い部分の限定された範囲である。スポット的に高含水比となる部分は転圧時に転圧ローラの鉄輪に付着し、転圧の進行方向にある材料も付着させるため、転圧後に不陸が発生した。しかしながら発生した不陸差は10mm以内であり、本研究での施工の出来形管理上問題のない程度であった。

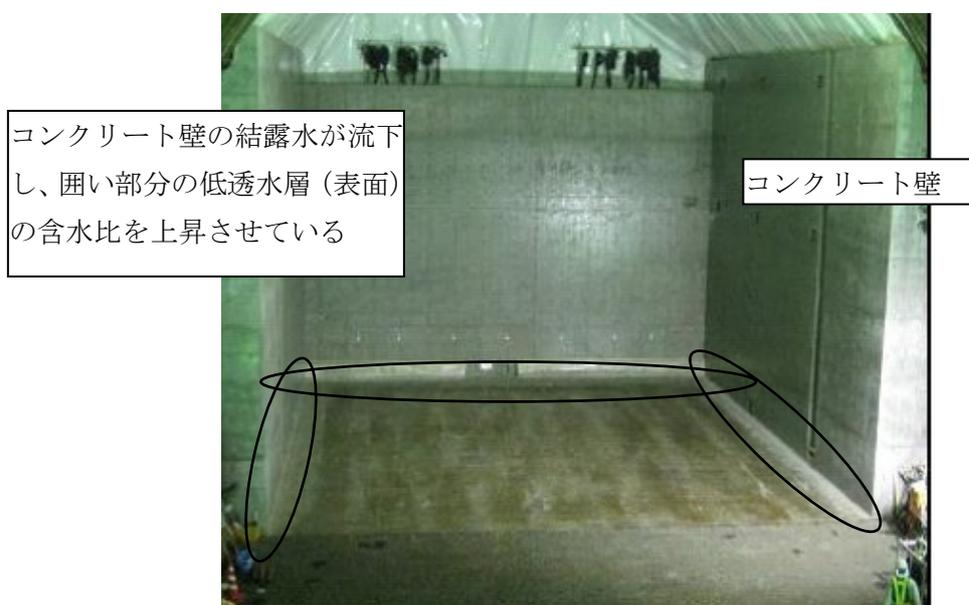


図 2.4-18 結露水の壁際の低透水層の含水比上昇への影響（引用文献²⁰⁾に加筆）

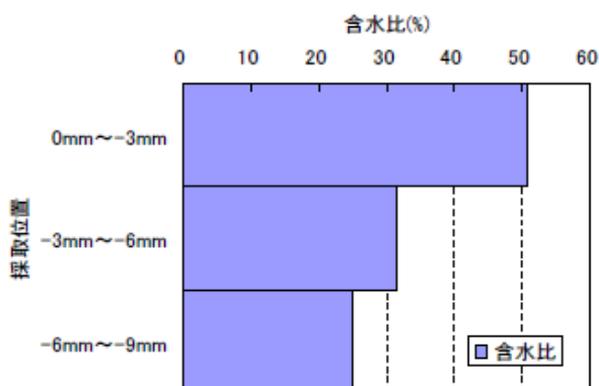


図 2.4-19 表面サンプリング試料の深さ方向の含水比分布²⁰⁾

2.5 施工後の品質確認

施工試験後の低透水層が所定の品質を確保できているかの確認を行った。また、得られた結果と主に試験室で作製された供試体を用いた既往データとを比較し、試験室で作製された供試体のデータが実際に処分施設を施工する時の検討材料になり得るかを検証した。

2.5.1 品質確認試験の概要

低透水層の要求機能に対する技術要件と本検討で実施した品質確認試験との関係を表 2.5-1 にまとめる。

透水特性に係る項目のうち透水係数は、直接的に透水特性を示すパラメータであり、乾燥密度は透水係数との相関性が高いことが示されており、間接的に透水特性を推定できるパラメータであるといえる。また、膨潤圧は、再冠水後の長期的な観点において、空洞内充填材の領域へのはらみ出しや周辺の亀裂・隙間への入り込みに関係し、透水特性にも影響を与えるパラメータである。

力学特性に係る項目は、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験（UU 条件）、平板載荷試験によって得られる強度、強度定数（粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ ）、変形係数である。力学特性は、建設・操業段階における施設の力学的安定性の確保ができることを確認する項目なので、これらの試験は再冠水前の状態を想定し、不飽和の状態で行った。

転圧後の底部低透水層から採取した試料を対象とし、表 2.5-1 に示す各種品質確認試験を行った（平板載荷試験は原位置にて実施）。試料採取はボーリングやコアリングで行った。回収したコアを整形（トリミング）して供試体を作製し試験に供した。

表 2.5-1 技術要件と品質確認試験との関係

技術要件	品質確認試験方法	
透水特性	JGS 0312	透水試験
	JIS A 1217を参考	膨潤圧試験
力学特性	JIS A 1216	一軸圧縮試験
	JGS 0521	三軸圧縮試験（UU）
	JGS 1521	平板載荷試験

2.5.2 透水試験の結果

施工後に回収した直径 100mm のコアを厚さ方向に 3 分割し、直径 60mm、高さ 10mm になるように成形して 3 個の供試体を作製した。成形した供試体をステンレス製の剛壁試験セルに押し込んでセットした。この時、試験セルより若干大きめの直径で成形した。これにより、供試体の側壁部分を削りながら押し込むこととなり、試験セル内壁と密着させることができる。試験は差圧型の定圧透水試験とし、給水側と排水側に 0.2MPa 程度の圧力差をつけ、供試体には背圧を 50kPa 程度かけた。透水試験の結果より、透水係数と乾燥密度

の相関性を確認し、図 2.5-1^{10)~14), 21), 22)}に試験結果を示す。

注水開始後約 50 日後から排水側でも通水が確認され、約 70 日で透水係数の値が安定した。粒状ベントナイトを対象に取得された既往の知見における透水係数の値^{10)~14)}と同様に、乾燥密度と透水係数の相関性が見られる。図中の近似式は、これまで得られている透水係数のうち、底部および側部の低透水層のデータ^{21), 22)}を除いたものから得られた近似式で、本試験の結果を含まないものである。本試験の結果は既往のデータと良く整合した結果である。

また、側部低透水層から採取した供試体の試験結果と、既往知見による室内成型供試体を用いた試験結果とが、同様な乾燥密度と透水係数との相関性をもつことを確認できた。このことから、室内成型で作製した供試体を用いた透水試験の結果も、実際の地下環境下で施工される処分施設の設計・建設時の検討材料として活用できると考えられる。

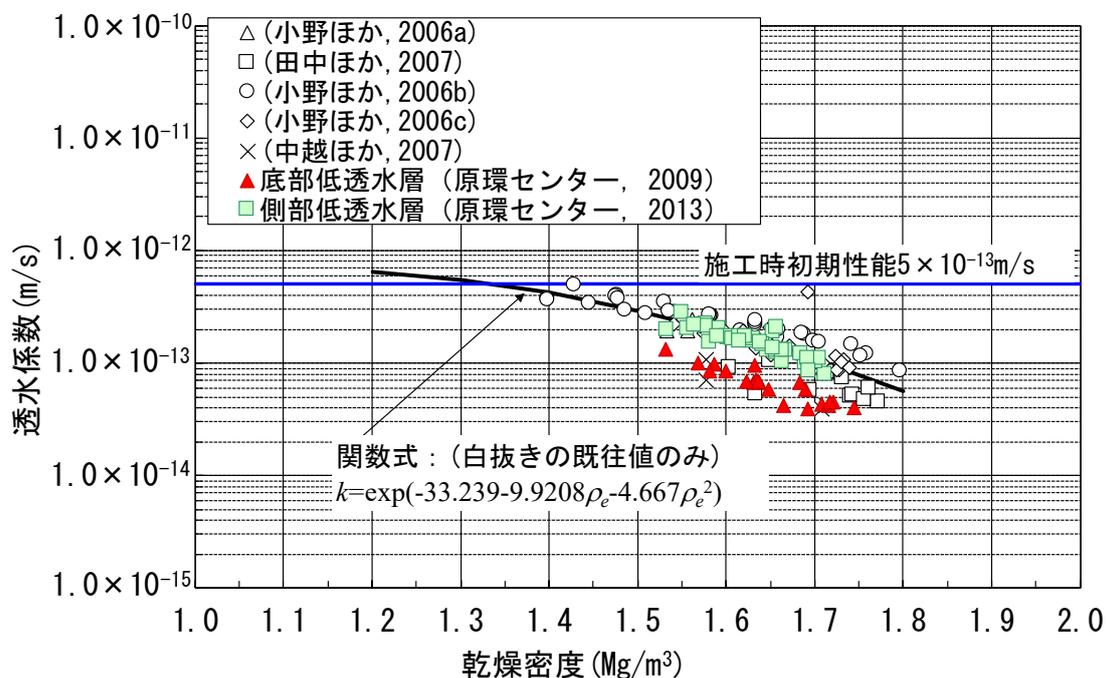


図 2.5-1 粒状ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係^{10)~14),21),22)}

次に、透水性能の異方性について確認した結果を示す。これは、層内の密度分布がそのまま異方性につながると考えられるためである。図 2.5-2 に示すように地下水がコンクリートピットに向かって流れることを想定すると、底部は転圧方向に通水するため必ず転圧表面の高密度の層を通過する必要がある、透水性能としては有利な方向であると考えられる。一方、側部は転圧方向に直交方向の水の流れとなるため、選択的に密度が低い層を流れることが考えられる。

このことを考慮して、同一層内の鉛直方向の密度分布を測定した。結論として、同一層内

で最も密度が低い部分でも 1.4Mg/m^3 という乾燥密度であり、乾燥密度と透水係数の関係から想定しても十分に透水性能は担保できていると考えられる。

また、図 2.5-3 転圧方向と直交方向に通水した透水試験の結果²³⁾を参照すると、通水方向によらず、 $1.0 \times 10^{-13}\text{m/s}$ 程度の透水係数を発揮しているといえる。

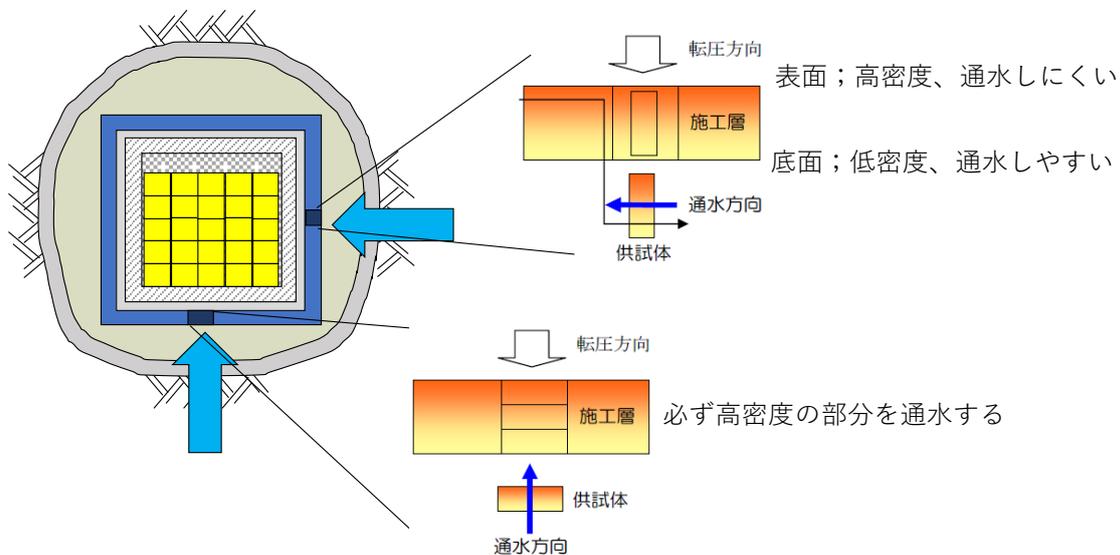


図 2.5-2 通水方向の違いの概念図

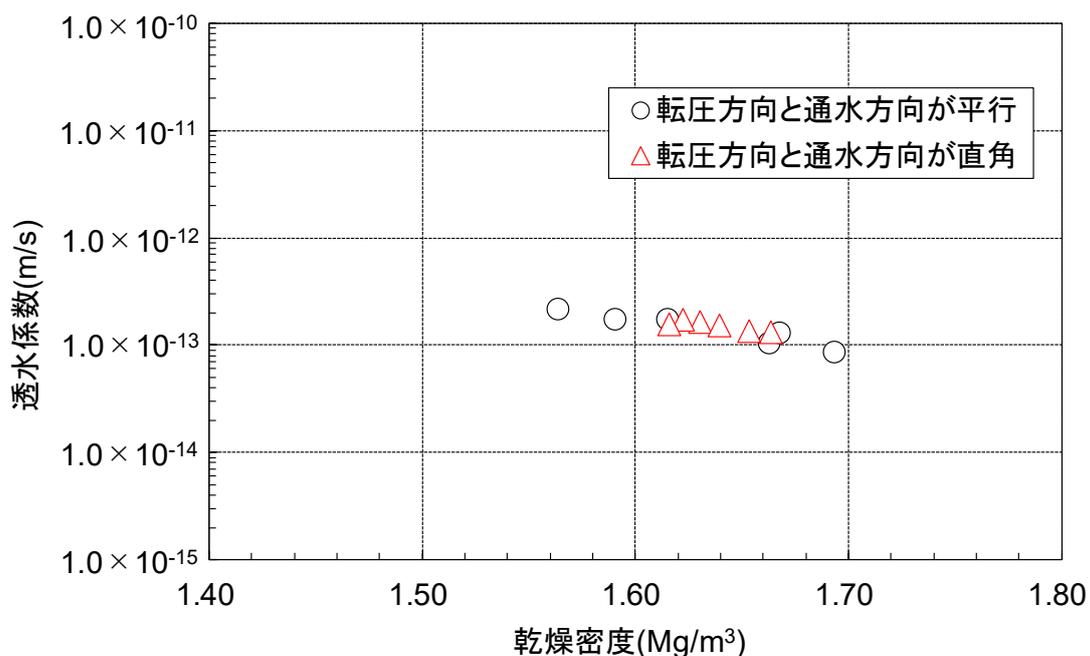


図 2.5-3 乾燥密度と透水係数の関係（通水方向の影響）（引用文献²³⁾に加筆）

2.5.3 膨潤圧試験の結果

膨潤圧測定試験は、供試体を定体積状態となるように試験装置にセットし、浸潤させることにより発生する荷重を測定するものである^{10)・24)}。膨潤圧測定試験に用いる供試体も、透水試験の場合と同様に、施工後に採取した直径 100mm のコアを厚さ方向に 3 分割し、直径 60mm、高さ 20mm になるように成形した。成形した供試体をステンレス製の剛壁試験セルに押し込んでセットした。この時、試験セルより若干大きめの直径で成形した。これにより、供試体の側壁部分を削りながら押し込むこととなり、試験セル内壁と密着させ体積変化が生じないようにできる。鉛直方向に変位しないように体積拘束した圧密試験機を用いて給水後に発生する圧力を測定した。

これまでも粒状ベントナイトを対象にした膨潤圧測定試験は実施されており、その結果と今回の測定結果の比較を図 2.5-2 に示す。同図の相関式は、既往の結果^{10)・24)}より求めた。

膨潤圧試験に関しても、側部低透水層から採取した供試体を用いた試験結果での乾燥密度と膨潤圧との相関性と、既往知見で得られている室内成型の供試体の乾燥密度と膨潤圧との相関性とが同様であることを確認できた。すなわち、室内成型で作製した供試体を用いた膨潤圧測定結果も実際の施設の設計・建設時における検討材料として活用できると考えられる。

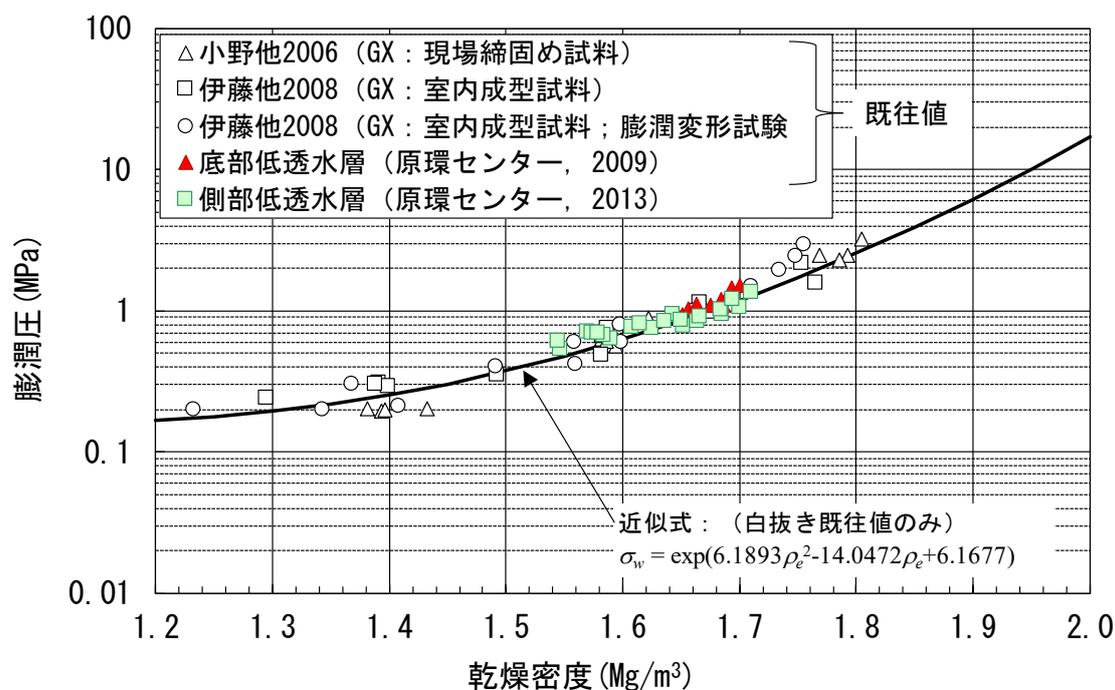


図 2.5-4 膨潤圧の測定結果の既存値^{10)・24)}との比較

2.5.4 底部低透水層における力学特性に係る試験の結果

施工箇所から採取した供試体を用いた一軸圧縮試験結果を図 2.5-3、図 2.5-4 に示す。こ

れまでも同じ産地・粒径分布の粒状ベントナイトを対象にした一軸圧縮強さが含水比と乾燥密度をパラメータとして実施されており²⁵⁾、ベントナイトの一軸圧縮強さは含水比の増加に伴い低下し、乾燥密度の増加に伴い増加する傾向となっている。本論文の試験結果も同様の傾向になった。

図 2.5-5 に、同じ産地・粒径分布の粒状ベントナイトを用いた一軸圧縮試験より得られた変形係数 (E_{50}) と施工後に実施した平板載荷試験から得られた変形係数と含水比の関係を示す。一軸圧縮試験で得られる変形係数 (E_{50}) は、供試体の一軸圧縮強さの 1/2 の応力と載荷原点とを結んだ割線静弾性係数として求めた。平板載荷試験は、直径 300mm 載荷板、1 サイクル方式 (単調載荷) による「地盤の平板載荷試験 JGS1521」で行い、変形係数は単調載荷ではあるが、接線弾性係数の算定方法を適用した。2 つの測定方法によらず、含水比の増加に伴い変形係数が小さくなるような相関性が同図に併記した既往知見²²⁾と同様に見られる。

三軸圧縮試験 (UU 条件) は、採取時の含水比 (不飽和状態, 3 本の供試体の含水比の平均値: 20.1%) で、側圧を 1.0MPa, 2.5MPa, 4.0MPa で実施し、モールの応力円から強度定数 (c , ϕ) を取得した。施工箇所から採取した供試体の強度定数は、粘着力 c : 0.35MPa, 内部摩擦角 ϕ : 4.7°であった。

本研究で得られた変形係数・強度定数が要求機能を満足する力学特性を確保しているかの確認として、既往の研究で実施されている変形解析で用いられている入力パラメータとの比較と解析結果をもとに検証した。

この既往研究では、本研究の底部低透水層と同程度の性能の材料特性値 (変形係数; 68MPa 程度, 乾燥密度; 1.62Mg/m³, 粘着力 c : 0.22MPa, 内部摩擦角 ϕ : 5.7°) をもつ底部緩衝材 (本研究における底部低透水層に該当) を対象に Duncan-Chang モデルを適用した変形解析を行っている⁶⁾。その結果によると、底部緩衝材の変形モードは概ね一次的であり、総沈下量の 60%程度は廃棄体の荷重によるものであること、想定される荷重 (0.41MPa) に対して沈下量は 4~5mm 程度であること、Mohr-Coulomb の破壊基準で判断した結果、底部緩衝材に局所的な破壊は発生しないということが示されており、本論文で施工した底部低透水層と同程度の性能を有していれば、廃棄体を含むコンクリートピット等の施設に対して十分な支持力があると予想される。

強度試験に関しても、既往知見で得られている 3 つの相関性、すなわち含水比と一軸圧縮強さとの相関性、乾燥密度と一軸圧縮強さとの相関性、および含水比と変形係数との相関性が、底部低透水層から採取した供試体を用いた試験結果からも得られた。すなわち、室内成型で作製した供試体を用いた強度特性に関する測定結果も実際の処分施設の設計・建設時に検討材料として活用できると考えられる。また、既往研究での変形解析の結果を参照すると、廃棄体を含むコンクリートピット等の施設に対して十分な支持力を有していると考えられる試験結果が得られた。

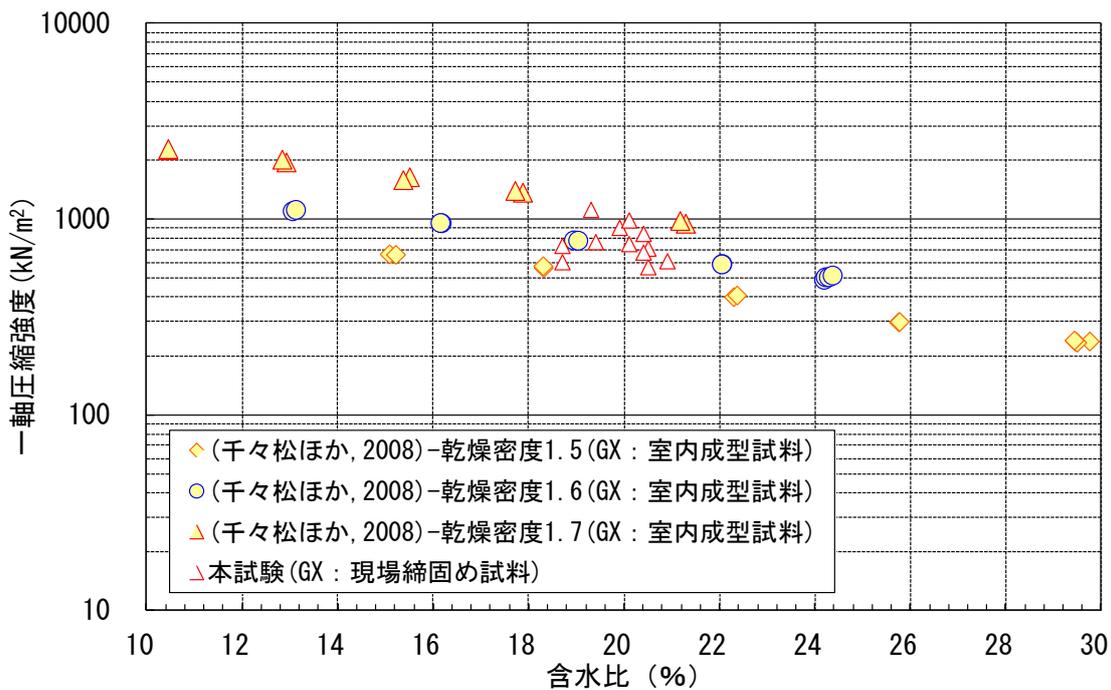


図 2.5-5 含水比と一軸圧縮強さの関係

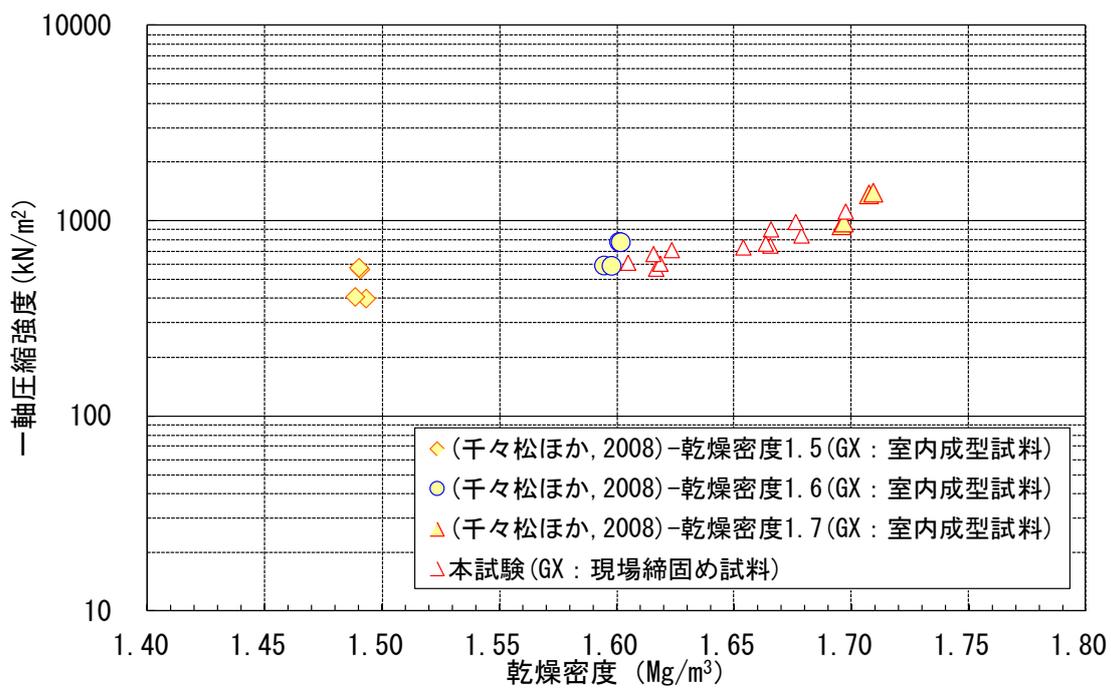


図 2.5-6 乾燥密度と一軸圧縮強さの関係

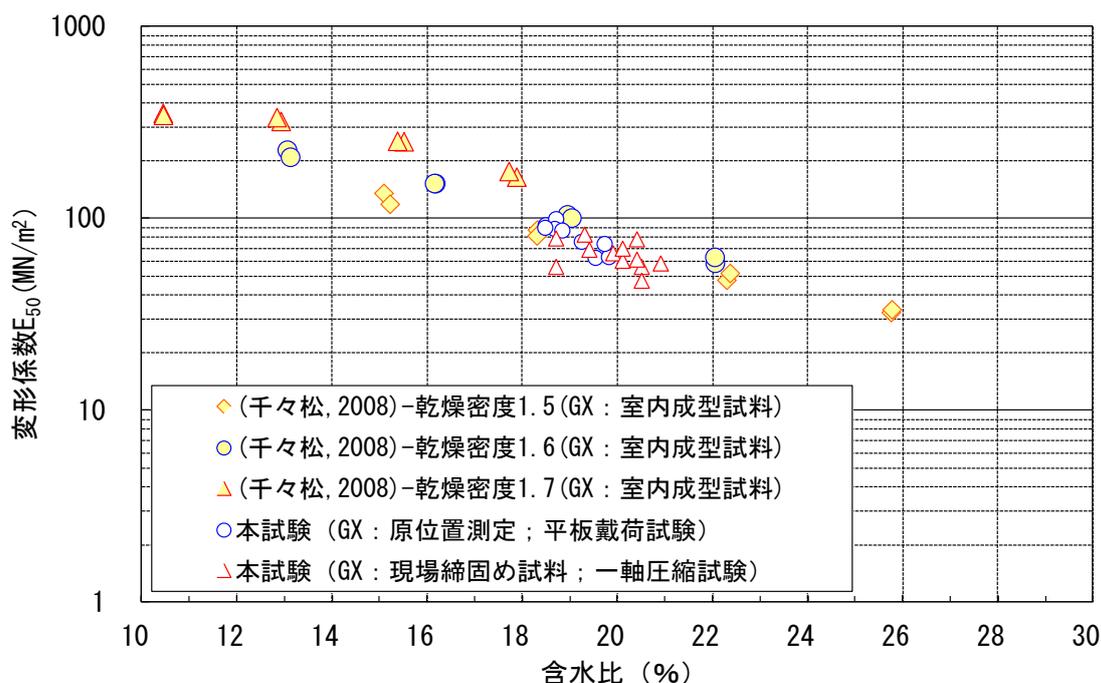


図 2.5-7 各試験方法により得られた変形係数の比較

2.6 まとめ

本章は中深度処分施設における人工バリアの一つである低透水層の施工方法と施工時の品質管理を定め、それらの方法で施工した後の品質測定結果についてまとめたものである。本章で得られた知見は以下のとおりである。

高密度な低透水層を構築できる材料として粉末ベントナイトより締固め性が高い粒状ベントナイトを用いて、極めて透水係数が小さい低透水層を構築できることを確認した。中深度処分の低透水層には極めて低い透水性が求められるため、できるだけ均質に締め固める必要があると考えた。そこで、アスファルト舗装に用いられる大型フィニッシャーを用いて敷均しに適用した。その結果、材料の敷均しにアスファルトフィニッシャーを適用して施工することが可能であることがわかった。また、敷均し後のかさ密度のばらつきの範囲は、 0.15 Mg/m^3 程度であった。

側部低透水層に関しては、さらに幅 1m ・高さ約 8m の狭隘なトレンチ状の、空間的に制限されている箇所にも適合した施工システムの検討も行った。アスファルトフィニッシャーの材料敷均し機構を取り入れた幅 1m の箇所でも敷均しができるベントナイト敷均し機、ピット上部からベントナイト敷均し機に材量を供給するベントナイト供給機を製作しこれらの適用性について施工試験を通して評価した。その結果、均一で平滑な敷均しを行うことができた。

次に、転圧についての実証試験を行った。

底部の低透水層については、小型振動ローラ、大型振動ローラを組み合わせ高品質の低

透水層の施工が可能であることを確認した。同一層内の鉛直方向に密度差があることを確認したが、乾燥密度は概ね管理目標値に収まることを確認した。平面位置によって異なる転圧条件の影響は、乾燥密度の分布として認められたが、分布幅が小さくほとんど影響しないことを確認した。敷均し時の密度のばらつきが転圧後の乾燥密度に与える影響も小さいことが分かった。

側部の低透水層については、転圧ローラの幅を変更した場合、敷均し厚さを変更した場合、同一条件で転圧した時の乾燥密度のばらつきの程度、平面位置の違い、のそれぞれの影響について確認した。転圧ローラの接地圧によって締固めエネルギーが到達する深さが変化することを確認できた。走行レーンを変えることにより壁際を含む横断方向にも満遍なく締固めエネルギーを与えられることも確認した。また、本研究で選択した施工方法では、締固めエネルギーは $4.5 E_c$ 相当 ($1 E_c \simeq 550 \text{ kJ/m}^3$) であると推定される。さらに、同一条件で施工を繰り返した結果、含水比調整、敷均し方法も含め、本研究で選択した施工方法によれば、転圧後の乾燥密度はある分布幅（ばらつき）を持つが、施工管理目標の値の範囲内に収めることが可能であることがわかった。

実際に構築した低透水層から採取した試料を用いた特性確認試験を実施した。その結果、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往知見の結果は、本研究で得られたデータと近い結果であることを確認した。そのため、これまでの室内試験で得られたデータも実構造物の設計・評価に用いることが可能であることがわかった。

以上の結果から、本研究で取り上げた施工方法の組み合わせ（ミキサー混合による含水比調整、アスファルトフィニッシャーによる敷均し、振動ローラによる現場締固め工法）により、中深度処分で計画されている地下環境においてベントナイトを用いた人工バリア（低透水層）に要求される水準の品質を満足する施工が可能であることを確認した。また、転圧機械と転圧幅・敷均し厚さ・転圧回数を規定して施工を複数層繰り返した結果、仕上がり密度のばらつきの程度を把握するとともに、要求性能を満足する施工が可能であることを確認できた。このことより、中深度処分施設における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能であることを確認できた。

第2章 参考文献

- 1) 山田淳夫、千々松正和、藤原斉郁、矢田勤、秋山吉弘、小峯秀雄、飯塚敦：放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価、土木学会論文集 C（地圏工学） 71(3) pp.147-162、2015.7
- 2) 山田淳夫、千々松正和、秋山吉弘、小峯秀雄、飯塚敦：放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施工品質の評価、土木学会論文集 C（地圏工学） 72(2) pp.164-178、2016.6
- 3) 小峯秀雄、緒方信英：塑性限界を導入した粘土の締固め特性の評価法の提案、土木学会論文集、No.436/III-16, pp.103-110, 1991.9.
- 4) (社)土木学会：余裕深度処分の地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、2009.
- 5) 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とりまとめー, pp.3-11~3-12, 2005.
- 6) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成17年度地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.12-1~12-35, 2006.
- 7) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性ー地層処分研究開発第2次とりまとめー, 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, pp.IV-77~IV-80, 1999.
- 8) 千々松正和, 吉越一郎, 中越章雄, 雨宮清：ベントナイトの現場締固め施工に関する検討(その1) 狭隘部の施工確認試験結果, 日本原子力学会2006年春の年会要旨集, B26, p.26, 2006.
- 9) 伊藤弘志, 千々松正和, 村上利一：ベントナイト層の現場施工用材料の開発, 第62回年次学術講演会概要集, CS05-001, pp.161-162, 2007.9.
- 10) 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和：現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果, 第61回年次学術講演会概要集, CS05-059, pp.323-324, 2006.9.
- 11) 田中幸久, 中村邦彦, 工藤康二, 廣永道彦, 仲神元順, 庭瀬一仁, 小松進一：地盤統計学手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.207-223, 2007.2.
- 12) 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中島均, 石井卓：ベントナイト原鉱石の高速透水試験ープレス飽和法一, 日本原子力学会「2006年秋の大会」, p.108, 2006.9.
- 13) 小野文彦, 庭瀬一仁, 谷智之, 中島均, 石井卓：ベントナイト原鉱石の高速透水試験ー締固め施工した供試体の乾燥飽和法一, 日本原子力学会「2006年秋の大会」, p.109, 2006.9.
- 14) 中越章雄, 千々松正和, 庭瀬一仁, 谷智之：ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討(その2)ー透水性に関する検討一, 第62回年次学術講演会講演概要集, CS5-008, pp.175-176, 2007.9.
- 15) 工藤康二, 田中幸久, 雨宮清, 中越章雄, 茂呂吉司, 千々松正和, 辻建二, 庭瀬一仁, 小松進一：ベントナイト原鉱によるコンクリートピット内締固め試験, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, CS1-050, pp.99-100, 2003.
- 16) 中越章雄, 雨宮清, 茂呂吉司, 千々松正和, 工藤康二, 田中幸久, 山崎直, 庭瀬一仁, 小松進一：ベントナイト原鉱の締固め特性に関する検討ー土槽を用いた締固め試験結果一, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, CS07-019, 2003.
- 17) 村上利一, 谷智之, 中越章雄, 千々松正和, 吉越一郎：余裕深度処分における側部ベントナイト層の現場施工に関する検討, 土木学会第62回年次学術講演会概要集, CS05-003, pp.165-166, 2007.9.
- 18) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成22年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.7-11~7-12, 2011.3.
- 19) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成23年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.7-29~7-34, 2012.3.
- 20) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.3-170~3-187, 2009.3.
- 21) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, p.3-279, 2009.3.
- 22) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.4-124~4-135, 2013.3.
- 23) 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書, pp.4-93~4-97, 2013.3.
- 24) 伊藤裕紀, 庭瀬一仁, 鈴木康正, 千々松正和：ベントナイトクニゲル GX の基本特性

試験（その1）膨潤挙動に関する検討，第63回年次学術講演会講演概要集，CS05-014，pp.195-196，2008.9.

25) 千々松正和，鈴木康正，伊藤裕紀，庭瀬一仁：ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験（その2）不飽和支持力に関する検討，土木学会第63回年次学術講演会概要集，CS05-15，2008.

第3章

浅地中ピット処分における 低透水層の施工と施工管理

浅地中ピット処分における低透水層の施工と施工後の品質管理に関する実証性の確認を行う目的で実施した施工試験についてまとめる。第3章では、施工試験に用いた材料の情報、練り混ぜ方法・施工方法、施工後の品質測定の方法、練り混ぜ後・敷均し後・転圧後の測定結果、および施工後の透水試験の結果についてまとめる。その後、本研究での施工方法における転圧後の乾燥密度や透水係数のばらつきの程度について整理する。施工試験および品質確認結果より、浅地中ピット処分における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能かを確認する。

3.1 浅地中ピット処分における低透水層の施工に関する具体的な課題

浅地中ピット処分施設の低透水層に求められている機能は低透水性である。低透水性を有する低透水層を構築するためには、中深度処分の場合と同様に十分に高密度に締め固められることが必要である。

浅地中ピット処分施設における低透水層の施工上の課題においても、土質材料の転圧による締め固め施工と同様の課題が挙げられる。すなわち、材料の練混ぜ製造、材料の敷均し、転圧時の締め固めである。また、施工後の品質が要求される性能を満足するものであるのかを確認する必要がある。これらの課題について、以下に詳述する。

3.1.1 材料の配合と施工時目標の設定に関する課題

浅地中ピット処分施設の低透水層の候補材料はベントナイト混合土である。2章で述べた中深度処分施設における低透水層と異なり、要求される透水性は透水係数で $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下と比較的大きい。また、地表面に近いこともありベントナイトの吸水膨潤挙動により埋設後に地表面が盤ぶくれのような状態になることも考えられる。このことは、ベントナイトの配合率は透水性を満足する限り少ない方が有利であることを示し、さらに材料費の抑制とも合致しており設計上合理的であるといえる。そのため、最適なベントナイトの混合率となるような配合の設定を行う必要がある。

加えて、施工時の管理項目の抽出と管理目標の値の設定を行う必要がある。これらの設定は、透水性という要求される機能を有する構造物を構築するために必要である。具体的には目標としての透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 程度以下となるような、乾燥密度や締め固め度を設定すべきである。

3.1.2 材料の敷均しに関する課題

中深度処分の低透水層と同様に、浅地中ピット処分の低透水層においても材料の敷均しを均一・平滑に行うことは重要である。そのため、浅地中ピット処分の低透水層の施工における敷均し作業でもアスファルトフィニッシャーを使用し、その適用性を検証する。

3.1.3 転圧による締固めに関する課題

浅地中ピット処分の低透水層においても実際に転圧し、施工性・締固め性を確認する必要がある。特に、材料がベントナイト混合土であるので転圧機械による締固めに最適な条件を抽出する必要がある、選定した材料・機械・工法を用いて実際に施工を行い確認する必要がある。

3.1.4 施工後の品質確認に関する課題

浅地中ピット処分の低透水層においても実際に施工した後に要求機能を確保できる技術要件を満たしているのかを確認する必要がある。施工後に乾燥密度・含水比・ベントナイトの混合率を測定し、所定の品質が得られているかの確認を行う。また、透水試験を実施し、低透水性という機能が満たされる施工が可能かどうかを実証する必要がある。

以上のように、低透水層には施工上の課題（材料の含水比の調整、材料の敷均し、転圧時の締固め性）および施工後の品質確認に関する課題がある。これらの課題に対する検討内容を表 3.1-1 に示す。それらについて次節以降で説明する。

表 3.1-1 浅地中ピット処分の低透水層に関する課題と検討内容

課題		検討内容
(1)	材料の配合と施工時目標の設定	透水性を満足する範囲において、可能な限り少ないベントナイトの配合率を設定する。また、要求機能を満たす施工時の乾燥密度等の目標値について、室内試験を実施して設定する。
(2)	材料の敷均し	アスファルトフィニッシャーを用いた敷均しを行いベントナイト混合土への適用性の検証を行うとともに、敷均し後のかさ密度を測定し、ばらつきの程度を確認する。
(3)	転圧による締固め	現状で適用できる転圧ローラを用いた締固めを行い、ベントナイト混合土への適用性を検証する。
(4)	施工後の品質確認	実際に施工した低透水層より採取した供試体を用いて室内試験を実施する。

3.2 配合設定の考え方と施工時の目標の設定

土構造物の施工において、通常の施工目標値の設定として締固め度を規定するやり方が一般的に行われている。これは、対象とする土構造物が主に道路・鉄道・宅地造成地であることより、主要な機能・性能として施工後の力学的安定性が求められているためである。締固め度、すなわち乾燥密度が高くなれば地盤反力や支持力といった力学的安定性も向上するため、表 3.2-1 に示すように対象構造物ごとに施工目標が設定されている¹⁾。

低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分における低透水層においても、ベントナイト混合土を用いた転圧施工を行う。そのため、現場での品質管理においても締固め度のような乾燥密度での管理を基本に実施することとした。

乾燥密度をベースにした施工管理を行うにあたって、目標とする乾燥密度を設定する必要がある。本節では、施工管理上必要な乾燥密度の設定の仕方に関する考え方をまとめる。

表 3.2.1 各機関の品質管理項目と規定値 1)

項目	国土交通省		東・中・西日本高速道路(株)**		都市再生機構***		国土交通省鉄道局****		国土開発技術研究所***** ターク*****
	盛土路体	路床	下部路体	上部路体	盛土	路体・路床	下部盛土	上部盛土	
	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210	JIS A 1210 (薬注法・砂注法)	JIS A 1210 (A法)	
密度比	90以上*1	90以上*1	92以上*2	97以上*2	一般施工 87以上*2 85以上*5 重要な部位 90以上*2 88以上*5	90以上*2 85以上*5	性能ランク I 95以上(92)*3 性能ランク II 90以上(87)*3 性能ランク III 90以上*4	性能ランク I 95以上(92)*3 性能ランク II 90以上(87)*3 性能ランク III 90以上*4	A: 90以上*5
空気間隙率 または飽和 度	B:15以下 C:10以下	-	B:18以下*2 C:18以下*2	-	一般施工 13以上*2 15以上*5 重要な部位 10以上*2 12以上*5	10以下	性能ランク II B:10以下*4 C:15以下*4	-	B:15以下*5 C:2~10*5
強度・変形 特性	粘性土85~98	たわみ量	CBR試験	たわみ量 CBR試験	コーン指数 C _q ≧ 400 kN/m ²	コーン指数 C _q ≧ 400 kN/m ² CBRおよび たわみ量は 設計図書による	平板載荷試験 FWD試験 小型FWD試験	性能ランク I K ₉₀ ^{#6} ≧ 110(70) 性能ランク II K ₉₀ ^{#6} ≧ 110(70) または 70(50) ≦ K ₉₀ ^{#6} < 110(70) 性能ランク III K ₉₀ ^{#6} ≧ 70 単位: MN/m ³	C:85~95*5
施工含水比	最適含水比と P_{max} の90%が得られる 湿潤側含水比の範囲	30cm以下	30cm以下	20cm以下	自然含水比またはトラフイカピリテイ が確保できる含水比	縮固め度および所定のたわみ規定を満 足する含水比	できるだけ最適含水比に近づける	トラフイカピリテイを確 保できる範囲	-
一層の仕上がり厚さ	30cm以下	20cm以下	30cm以下	20cm以下	まきだし厚さ 30cm~50cm	路体30cm以下 路床20cm以下	30cm程度 (50cm未満)	30cm以下	-

道路上工-施工指針 **設計要領第一集上工編 *工事共通仕様書 ***鉄道構造物等設計基準・同解説 (土構造物) ****河川土工マニュアル
 *1: 砂置換法による方法、*2: R計器による方法の115点の平均、*3: R計器、砂置換、突砂のいずれかによる方法の平均、*4: R計器、砂置換、突砂のいずれかによる方法、*5: 砂置換による方法の平均値、*6: 平均値
 A (細粒分<15%)、B (15%≦細粒分<50%)、C (50%≦細粒分)
 ※表中のカッコ内の数値は下限値

3.2.1 要求される透水性を確保するための配合設定

低レベル放射性廃棄物の浅地中ピット処分における低透水層の要求性能は低透水性であり、施工直後段階の目標値として透水係数で $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ が求められる。そのため、ベントナイトの混合率・乾燥密度をパラメータとして室内で締め固め試験と、締め固めた後の供試体を用いた透水試験を実施した。

透水試験の結果と締め固め曲線とを対比し、透水係数の要求を達成する条件を抽出することとした。以下に室内試験の概要と結果を示す。

3.2.1.1 使用材料

本研究で使用する材料のうちベントナイトは、宮城県荊田郡蔵王町産の Ca 型ベントナイトを用いた。使用ベントナイトの材料特性を表 3.2-2 に示す。メチレンブルー吸着量は $110 \text{mmol}/100\text{g}$ であり、純粋なモンモリロナイトのメチレンブルー吸着量を $140 \text{mmol}/100\text{g}$ とすると、モンモリロナイト含有量は 78.9% である。また、塑性限界が 42.5% と高く、液性限界は 139.5% である。

使用した砂の材料特性を表 3.2-3 に、粒径加積曲線を図 3.2-1 に示す。砂は三沢産コンクリート用細骨材（以下、単に砂と称す）を使用した。細粒分含有率は 0.2 % 程度であり、細粒分はほとんど無い。

表 3.2-2 Ca 型ベントナイトの材料特性

産地	宮城県荊田郡蔵王町
土粒子密度 (Mg/m^3)	2.70
モンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m^3)	2.77
ベントナイト中の随伴鉱物の土粒子密度	2.41
自然含水比 (%)	10.6
塑性限界 (%)	42.5
液性限界 (%)	139.5
pH	8.5
メチレンブルー吸着量 ($\text{mmol}/100\text{g}$)	110
モンモリロナイト含有量 (%)	78.9
膨潤力 ($\text{ml}/2\text{g}$)	7

表 3.2-3 砂(三沢産コンクリート用細骨材)の材料特性

産地	青森県三沢市
土粒子密度 (Mg/m^3)	2.748
自然含水比 (%)	2.6
細粒分含有率 (%)	0.6
最大粒径 (mm)	4.8
均等係数 U_c	4.7
曲率係数 U_c	0.66

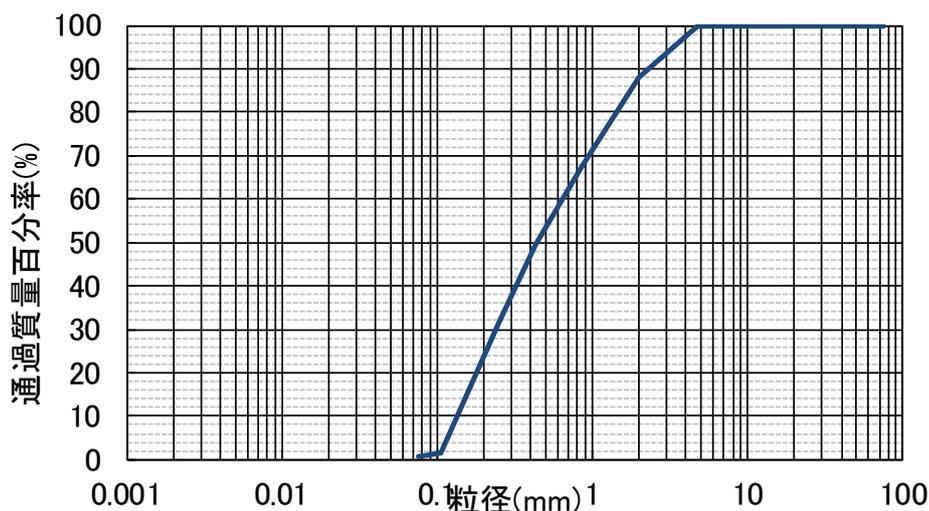


図 3.2-1 砂(三沢産コンクリート用細骨材)の粒径加積曲線

3.2.1.2 締固め試験の概要

(1) 締固め試験

室内試験は室内締固め試験と透水試験を実施した。締固め試験は「JIS A 1210 突固めによる土の締固め試験」²⁾準拠し、締固め方法は C-c 法 (非繰り返し・湿潤法) を採用した。

表 3.2-2 および表 3.2-3 に示したベントナイト・砂を表 3.2-4 に示す乾燥質量比で締め固めた。

締固め試験の結果のうち最大乾燥密度・最適含水比の一覧表を表 3.2-5 に、締固め曲線を図 3.2-2、図 3.2-3、図 3.2-4 にそれぞれ示す。図 3.2-5 に混合率が異なる場合の影響を見るため、各混合率の締固め曲線を同じグラフ上にプロットした。ベントナイトの混合率が高くなるに従い、乾燥密度が低くなり、含水比は高くなる傾向がみられた。混合率が低い場合、締固め性に関しては砂に似たような挙動を示したものと考えられる。

表 3.2-4 室内試験に用いたベントナイト・砂の構成比率

ケース名	ベントナイトの混合率 (%)	砂の構成率 (%)
Be20%	20	80
Be30%	30	70
Be40%	40	60

表 3.2-5 最適含水比および最大乾燥密度

ベントナイトの混合率 (%)	締固め規定値 C 値 (%)	最大乾燥密度 (Mg/m ³)	最適含水比 (%)
20	100	1.900	13.2
30	100	1.798	16.5
40	100	1.667	19.3

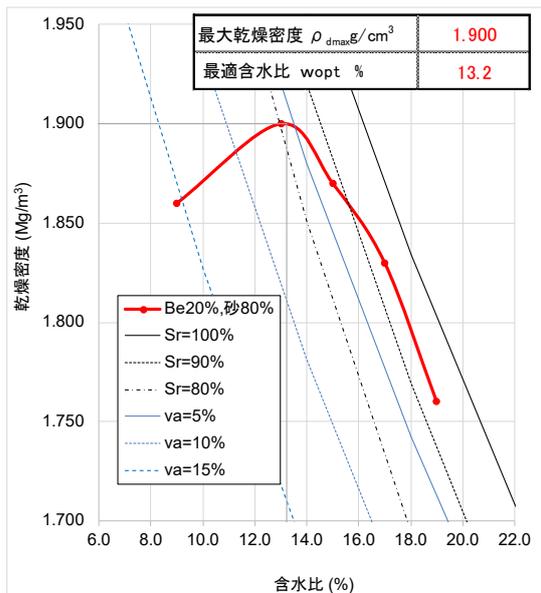


図 3.2-2 締固め試験結果 (Be20%)

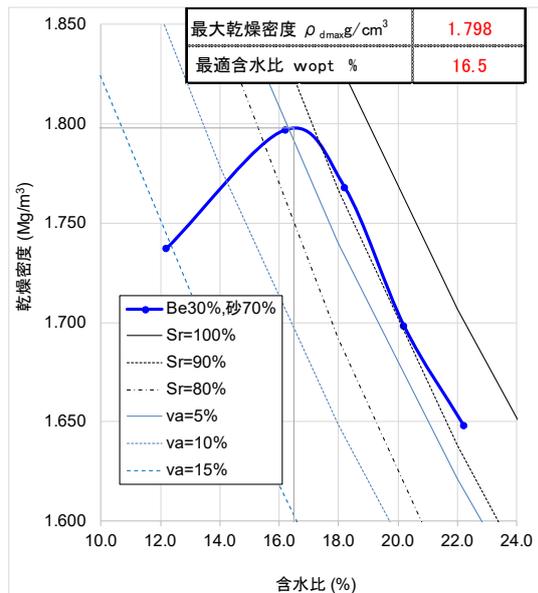


図 3.2-3 締固め試験結果 (Be30%)

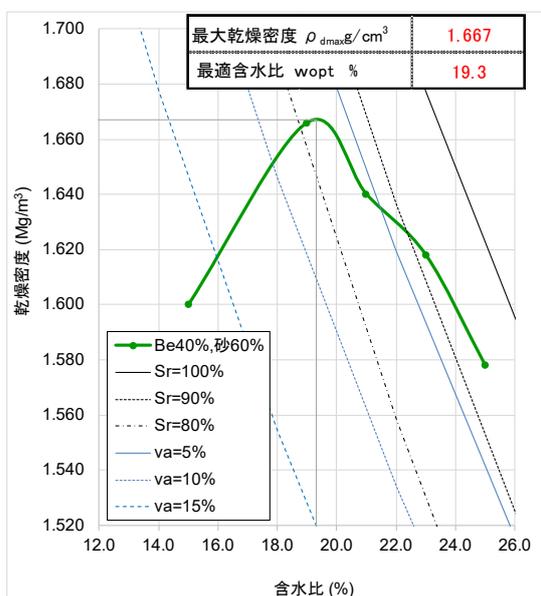


図 3.2-4 締固め試験結果 (Be40%)

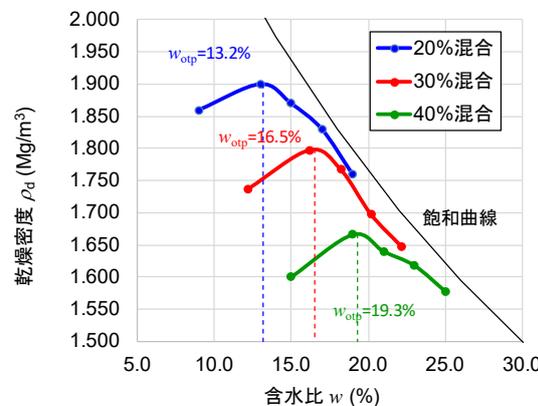


図 3.2-5 混合率が異なる締固め曲線

3.2.1.3 透水試験の概要

締固め曲線上の点，すなわち締固め規定値 $^3C=100\%$ の 5 点と，最適含水比よりも湿潤側の 4 点について締固め規定値 $C=97.5\%$ ， 95.0% の乾燥密度を算出し，それらの乾燥密度・含水比の条件で透水試験を実施した．試験条件一覧を表 3.2-6 に示す．

表 3.2-6 透水試験条件一覧表

ベントナイトの混合率(%)	締固め規定値 C 値(%)	乾燥密度(Mg/m ³)	含水比(%)	
20	100	1.86	9.0	
		1.90	13.0	
		1.87	15.0	
		1.83	17.0	
		1.76	19.0	
	97.5	1.85	13.0	
		1.82	15.0	
		1.78	17.0	
		1.72	19.0	
	95.0	1.80	13.0	
		1.78	15.0	
		1.74	17.0	
		1.67	19.0	
	30	100	1.74	12.2
			1.80	16.2
1.77			18.2	
1.70			20.2	
1.65			22.2	
97.5		1.75	16.2	
		1.72	18.2	
		1.66	20.2	
		1.61	22.2	
95.0		1.71	16.2	
		1.68	18.2	
		1.61	20.2	
		1.57	22.2	
40		100	1.60	15.0
			1.67	19.0
	1.64		21.0	
	1.62		23.0	
	1.58		25.0	
	95.0	1.58	19.0	
		1.56	21.0	
		1.54	23.0	
		1.50	25.0	

透水試験は地盤工学会基準「低透水性材料の透水試験方法」(JGS 0312)⁴⁾に準拠して実施する。透水試験方法を以下に示す。

- a) 透水円筒の流入側にビューレットを連結する。透水試験の状況を図 3.2-6 に、透水試験装置の概要を図 3.2-7 に示す。
- b) ビューレットの断面積 a (mm²) を求め、流出側の水面から測った高さ h_1 (mm) を設定する。
- c) 時刻 t_1 における h_1 を記録してから、バルブを開いて時刻 t_2 における h_2 を記録する。
- d) b) から c) の操作を繰り返し、算出される透水係数の値がほぼ一定となったことを確

認した後、3回以上の測定を行う。測定値の平均値からの変動が±50%におさまることではほぼ一定とみなす。

e) ビューレットと同条件で設置された水の水温 T (°C) をはかる。

f) 試験後の供試体の含水比 w_f (%) を求める。

次式により透水係数を算出する。

$$k_T = 2.303 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{1000} \quad \text{数式 3.2-1}$$

ここで、 k_T : T (°C)における透水係数 (m/s)

a : ビューレットの断面積 (mm²)

L : 供試体の長さ (mm)

A : 供試体の断面積 (mm²)

$t_2 - t_1$: 測定時間 (s)

h_1 : 時刻 t_1 における水位差 (mm)

h_2 : 時刻 t_2 における水位差 (mm)

2.303: 対数の底の変換による係数

1/1000: 単位を換算するための係数



図 3.2-6 透水試験の状況

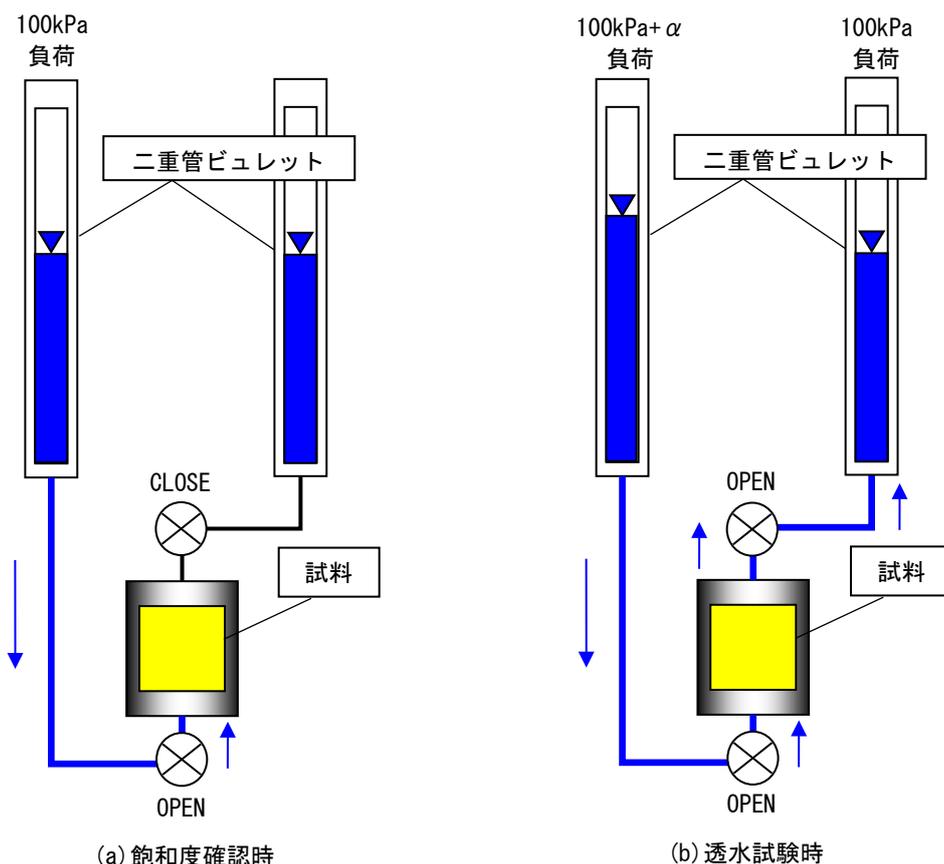


図 3.2-7 透水試験装置の概要

透水試験の結果（引用文献⁵⁾に加筆）の一覧表を表 3.2-7 に示す。透水試験の結果を締固め曲線と併記して、目標の透水係数である $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ を満足する乾燥密度・含水比を調べた。その結果を図 3.2-8～図 3.2-11 に示す。透水係数を満足するベントナイト混合率は 30%と 40%であり、ベントナイト混合率 30%でも締固め規定値が $C=97.5\%$ 以上、含水比は最適含水比よりも湿潤側でなければ満足しないことが分かった。ベントナイト混合率 40%のケースでも締固め規定値が $C=95\%$ の場合透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ を満足しないため、ベントナイト混合率 40%のケースの場合でも締固め規定値は $C=95\%$ 以上が必要であることがわかる。このことより、ベントナイト混合率 30%、締固め規定値が $C=97.5\%$ 以上が合理的な配合比率であると判断できる。また、同時に施工時における施工管理目標として、乾燥密度の到達目標を締固め規定値 $C=97.5\%$ 以上、含水比も最適含水比 $w_{opt}+2.0\%$ 以上というものが目安となることがわかる。

本研究では、施工時の管理目標を締固め規定値 C 値は下限値として $C=95.0\%$ 以上、平均で $C=97.5\%$ 以上、含水比は材料の練混ぜ製造時のばらつきを考慮して、 $(w_{opt}+4.0\%) \pm 2.0\%$ 、ベントナイトの混合率に関しても練混ぜ製造時のばらつきを考慮して $30.0 \pm 2.0\%$ と暫定的に設定し施工することとした。

表 3.2-7 透水試験結果一覧表 (引用文献⁶⁾に加筆)

ベントナイトの 混合率(%)	締固め規定値 C 値(%)	乾燥密度(Mg/m ³)	含水比(%)	透水係数 (m/s)
20	100	1.86	9.0	9.34×10^{-10}
		1.90	13.0	3.39×10^{-10}
		1.87	15.0	7.17×10^{-11}
		1.83	17.0	2.55×10^{-11}
		1.76	19.0	5.46×10^{-11}
	97.5	1.85	13.0	1.45×10^{-9}
		1.82	15.0	4.56×10^{-10}
		1.78	17.0	1.80×10^{-10}
		1.72	19.0	2.75×10^{-10}
	95.0	1.80	13.0	5.61×10^{-9}
		1.78	15.0	2.58×10^{-9}
		1.74	17.0	1.14×10^{-9}
		1.67	19.0	1.27×10^{-9}
30	100	1.74	12.2	9.39×10^{-11}
		1.80	16.2	2.65×10^{-11}
		1.77	18.2	1.01×10^{-11}
		1.70	20.2	2.14×10^{-11}
		1.65	22.2	1.64×10^{-11}
	97.5	1.75	16.2	1.22×10^{-10}
		1.72	18.2	5.08×10^{-11}
		1.66	20.2	9.26×10^{-11}
		1.61	22.2	8.52×10^{-11}
	95.0	1.71	16.2	5.24×10^{-10}
		1.68	18.2	2.38×10^{-10}
		1.61	20.2	3.76×10^{-10}
		1.57	22.2	4.15×10^{-10}
40	100	1.60	15.0	2.40×10^{-11}
		1.67	19.0	1.44×10^{-11}
		1.64	21.0	1.00×10^{-11}
		1.62	23.0	4.90×10^{-12}
		1.58	25.0	4.70×10^{-12}
	95.0	1.58	19.0	9.66×10^{-11}
		1.56	21.0	1.60×10^{-10}
		1.54	23.0	1.68×10^{-10}
		1.50	25.0	1.10×10^{-10}

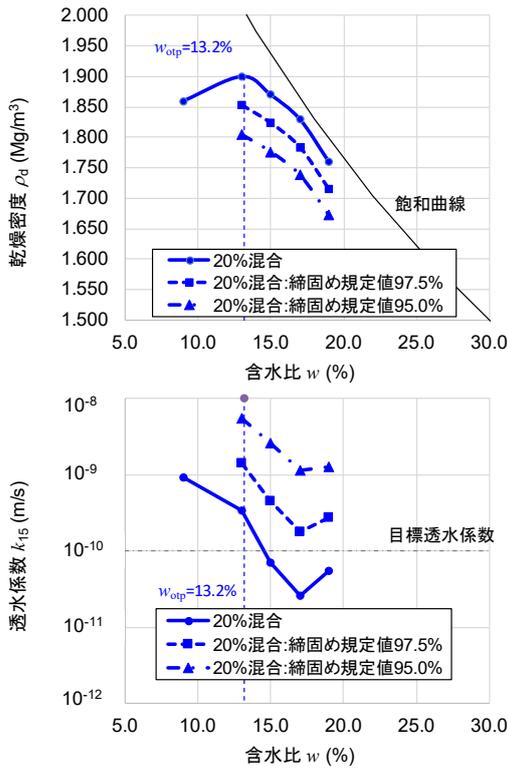


図 3.2-8 締固め曲線と透水係数 (Be20%)

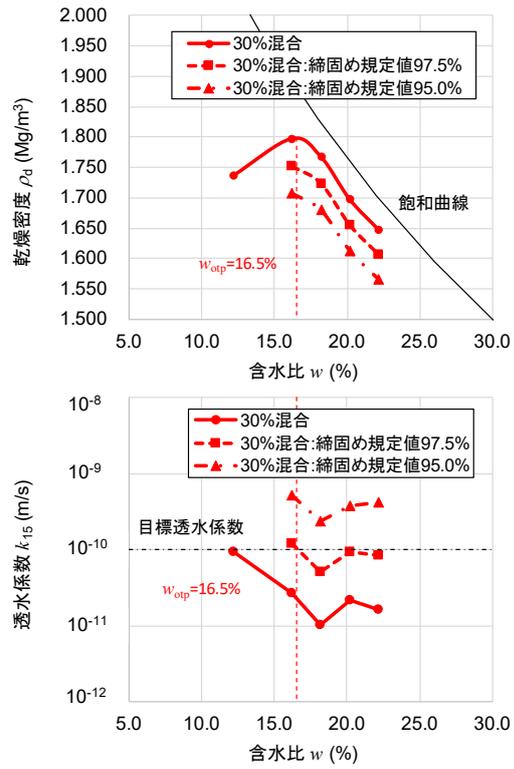


図 3.2-9 締固め曲線と透水係数 (Be30%)

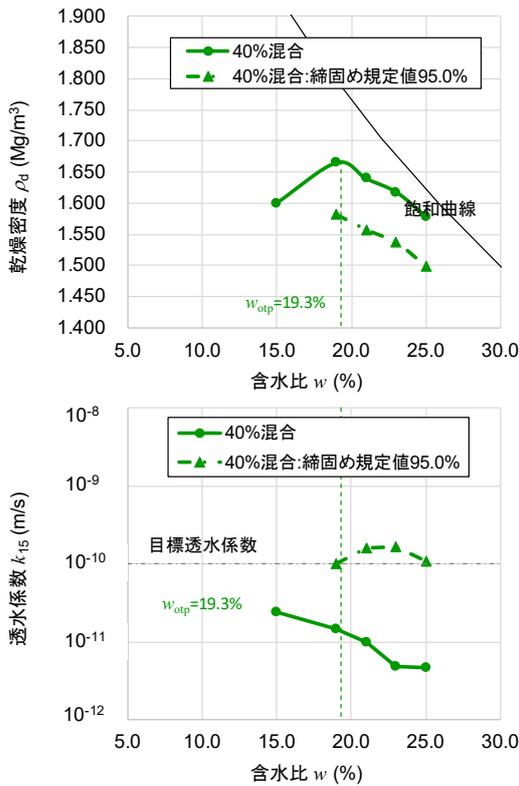


図 3.2-10 締固め曲線と透水係数 (Be40%)

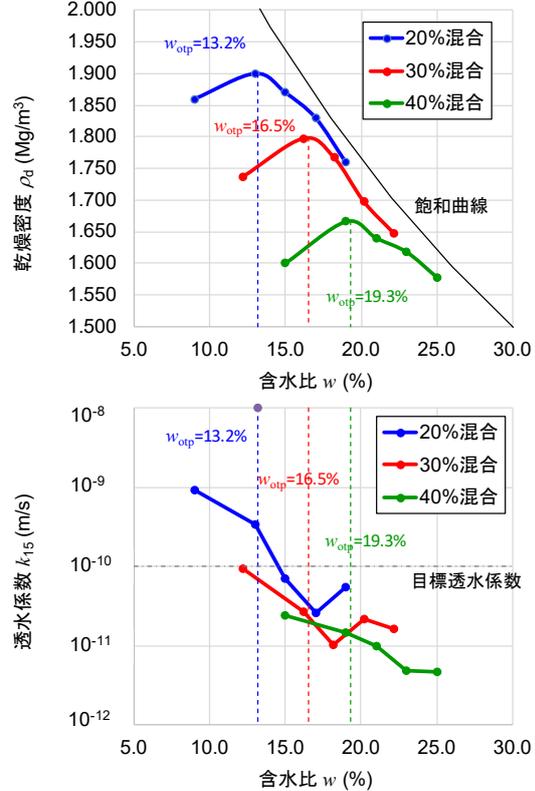


図 3.2-11 締固め曲線と透水係数 (全ケース)

3.3 実施工を模擬した施工試験の実施

3.3.1 実施概要

実際の施工を想定した試験計画を予め策定し施工試験を行った。施工試験は表 3.3-1～表 3.3-3 に示す条件を考慮した。

表 3.3-1 施工試験に使用する主要材料

項目	仕様
Ca 型ベントナイト (クニボンド RW)	MBC120 以上
混合砂	青森県三沢砂

表 3.3-2 施工試験に用いる主要機械

項目	仕様
敷均し機械	小型アスファルトフィニッシャー
転圧機械	小型振動ローラ

表 3.3-3 施工試験の条件

項目	仕様
ベントナイト混合率	30wt%±2%
施工含水比	$\omega_{opt}+4 \pm 2\%$ (19.0%±2%)
締固め規定値 (C 値)	95%以上 (平均で 97%以上)
敷均し厚さ	10cm 程度
覆土施工幅	2m 以上

3.3.2 試験概要

図 3.3-1 に試験概要のイメージ図を示す。また、図 3.3-2 に試験ヤード図を示す。既設のコンクリートピットを処分ピットに見立てて、その側面において幅 2.0m の難透水性覆土を施工することを模擬する。材料製造は、施工試験ヤードでは実施せず、ミキサー等の練混ぜ製造設備を保有する工場で行うこととした。

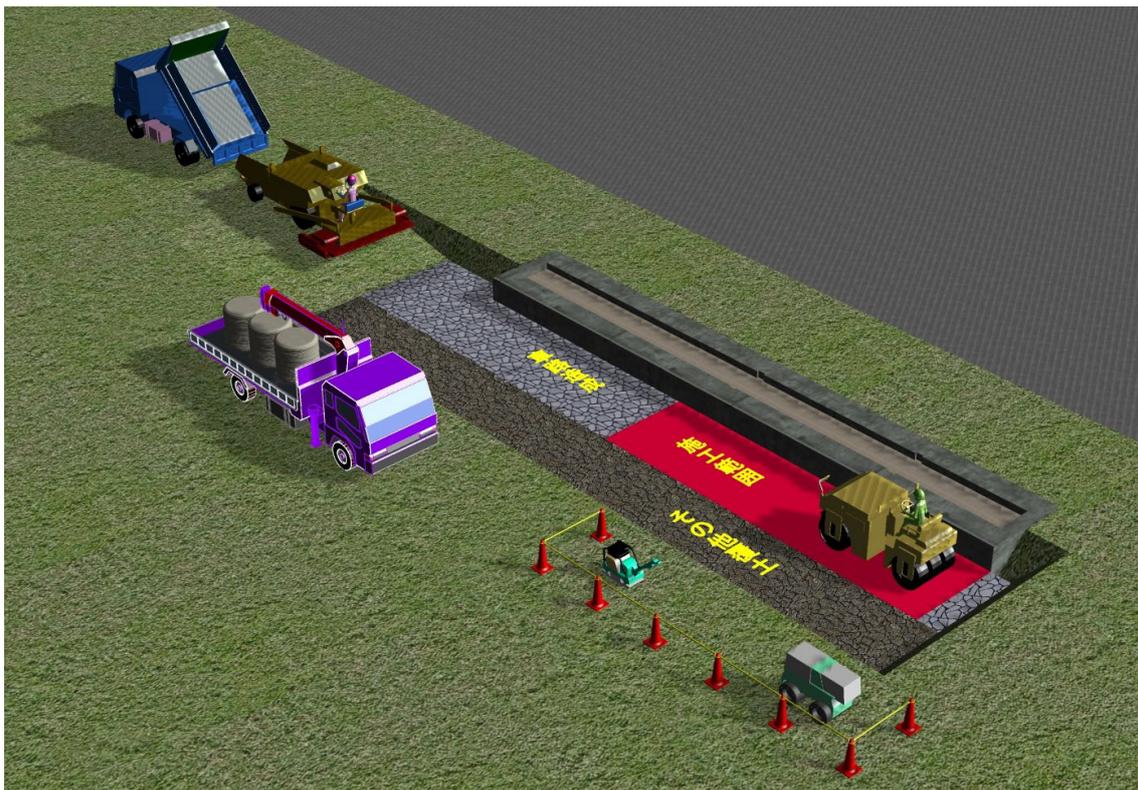


図 3.3-1 試験イメージ図

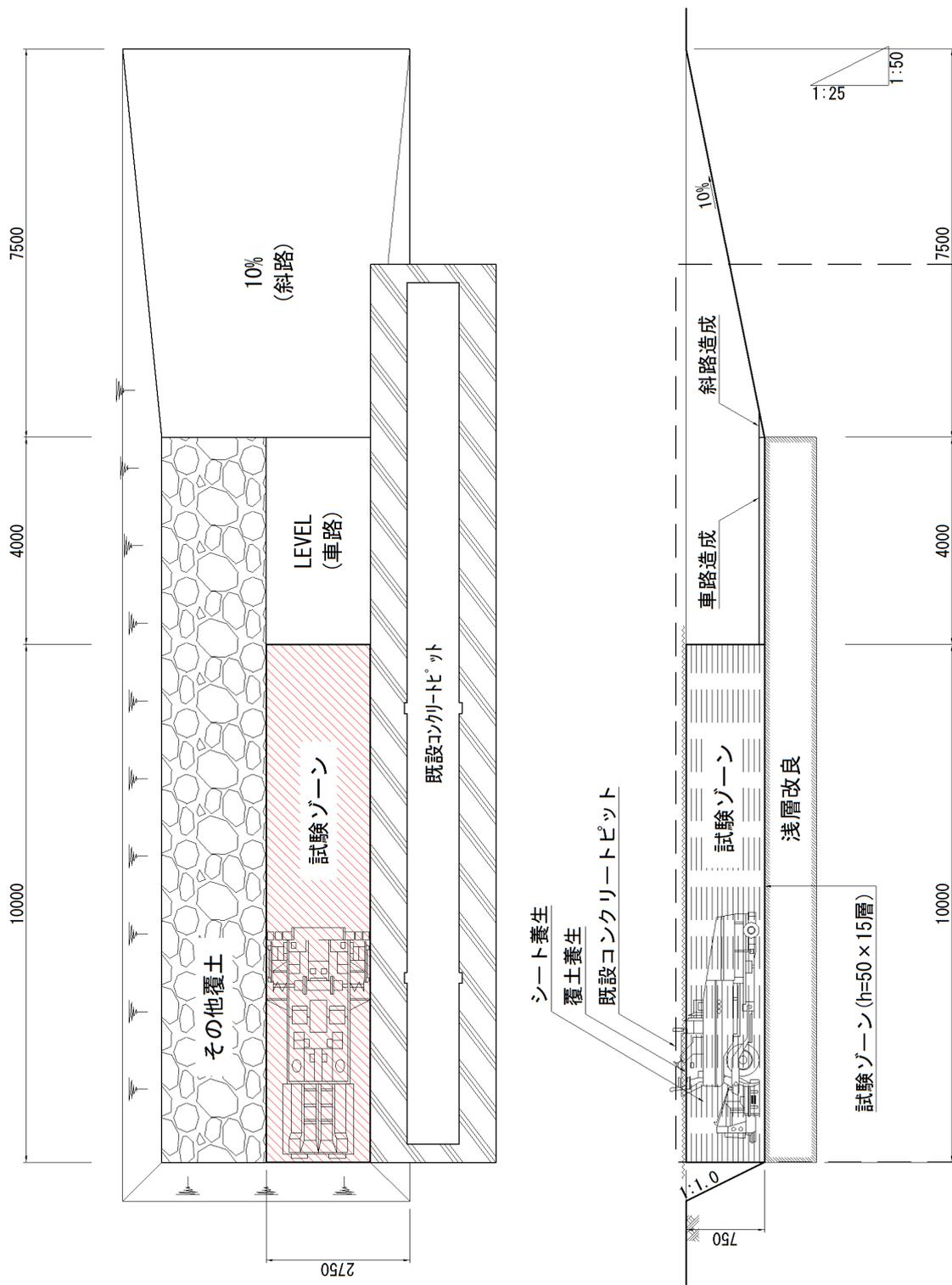


図 3.3-2 試験ヤード図

3.3.3 主要機械

表 3.3-4 に使用する機材の一覧を示す。本研究では、材料の敷均しにアスファルトフィニッシャーを用いることとした。通常の土工事のように人力敷均しやブルドーザーによる撒出し・敷均しでは、敷均し後の密度や厚さにばらつきが生じ、転圧後に均一な密度とならないと考えられたからである。これは、透水性に関する弱部をできるだけ排除するための措置である。アスファルトフィニッシャーの適応性は 2 章でも示したとおり既往の研究で実証されており^{7) 8)}、また施工のばらつき（高さおよび敷均し後の見かけの湿潤密度）も人力による敷均しに比べ少ないことがわかっている。

表 3.3-4 使用機材一覧

名称	仕様	単位	数量
攪拌付回転容器型ミキサー	1m ³	台	1
アスファルトフィニッシャー	1.9～3.1m	台	1
小型振動ローラ	1.5t	台	1
コンバインドローラ	4.0t	台	1
ハンドガイド振動ローラ	635kg	台	1
ダンプトラック	2.0t	台	1
バックホウ	0.45m ³	台	1

3.3.3.1 攪拌付回転容器型ミキサー

攪拌付回転容器型ミキサーを図 3.3-3 に示す。また主要諸元を表 3.3-5 に示す。攪拌付回転容器型ミキサーは原料を容器ごと回転させる。これに対し偏心位置で逆方向回転するアジテータが、原料への高い剪断力を発生させる。複雑な流れの中で生じる速度差が、ミクロで緻密な混合を実現している。スクレーパは、パン壁や底に留まろうとする原料を絶えず引き剥がし、アジテータ部に送り込む。



図 3.3-3 攪拌付回転容器型ミキサー

表 3.3-5 攪拌付回転容器型ミキサーの主要諸元

メーカー	日本アイリッヒ
装置概略	攪拌付回転容器型
ミキサー名	アイリッヒミキサー
形式	DEV22
容量	2,250L
回転数	アジテータ：660rpm パン：8.4rpm
投入量	1,000kg

3.3.3.2 アスファルトフィニッシャー

図 3.3-4 に示すような小型のアスファルトフィニッシャーを使用する。アスファルトフィニッシャーを用いて、敷き均し厚さ 100mm で 2m 幅を敷き均す。アスファルトフィニッシャーの主要諸元を表 3.3-6 に示す。



図 3.3-4 アスファルトフィニッシャー

表 3.3-6 アスファルトフィニッシャーの主要諸元

メーカー	SUMITOMO
型式	HB25W-5B
機体長	4,685mm
機体高	1,955mm
機体幅	1,665mm
機体質量	5.36t
舗装速度	1.0～10.0m/min
舗装幅	1.4～2.5m
舗装厚	10～120mm

3.3.3.3 小型振動ローラ

小型振動ローラを図 3.3-5 に示す。また主要諸元を表 3.3-7 に示す。小型振動ローラは、本来トレンチ状の溝掘削場所における底面転圧に使用される振動ローラである。その構造上、壁際までの締固めが可能である。また、同形の振動ローラに比べて振幅や起振力が大きい点も特徴である。土工用ローラ（凸凹）を平滑に改造し、壁コンクリート保護のための防護材を貼付けたものを使用する。

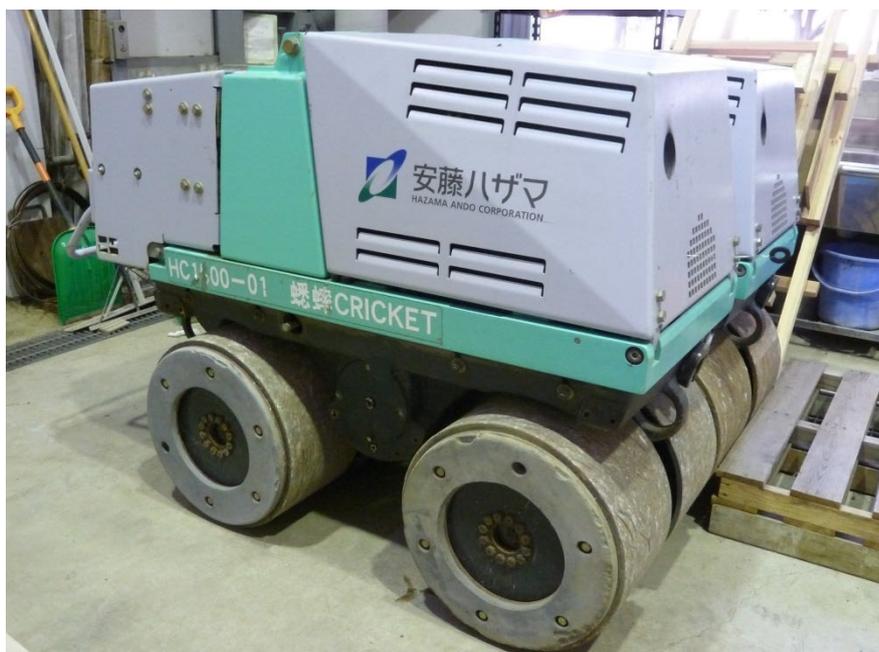


図 3.3-5 小型振動ローラ（HC1500-1）

表 3.3-7 小型振動ローラの主要諸元

メーカー	安藤ハザマ
型式	HC1500-1
機体長	1,500mm
機体高	1,200mm
機体幅	610mm～850mm
機体質量	1,548kg
周期	32Hz
振幅	2.1mm
起振力	80kN
速度	1.2km/時

3.3.3.4 コンバインドローラ

コンバインドローラを図 3.3-6 に示す。また主要諸元を表 3.3-8 に示す。コンバインドローラは、中規模舗装工事のあらゆる締固め作業で、最適な振動モードを選択できる小型コンバインド振動ローラである。現場に合わせた振動モードを選択できる振幅切換機構を有しており、転圧路面のひきずりやクラックの発生を制御する自動差動制御機構を採用している。また、3系統ブレーキシステムを標準装備しており、フィルター付き樹脂製散水タンク、ステンレス製パイプ、フィルター付き金属製ワントッチノズルを標準装備している。



図 3.3-6 コンバインドローラ

表 3.3-8 コンバインドローラの主要諸元

メーカー	酒井重工業
運転質量	3,540kg
機械質量	3,230kg
全長	3,105mm
全幅	1,390mm
全高	1,705mm
締固め幅	1,300mm
走行速度	0-9km/h
起振力 低/高	26.5/34.3kN

3.3.3.5 ハンドガイド振動ローラ

ハンドガイド振動ローラを図 3.3-7 に示す。また主要諸元を表 3.3-9 に示す。側部の碎石の埋め戻しには下図に示すハンドガイド振動ローラを用いる。施工実績も多く、様々な工事で用いられている機種である。



図 3.3-7 ハンドガイド振動ローラ

表 3.3-9 ハンドガイド振動ローラの主要諸元

メーカー	酒井重工業
型式	HV60ST
機体長	2,430mm
機体高	1,180mm
機体幅	680mm
機体質量	635kg
起振力	11.8kN
速度	3.5km/h

3.3.4 施工手順

試験施工は、図 3.3-8 に示す施工フローに従い実施した。図 3.3-9、図 3.3-10 に各施工段階における概要図を示す。

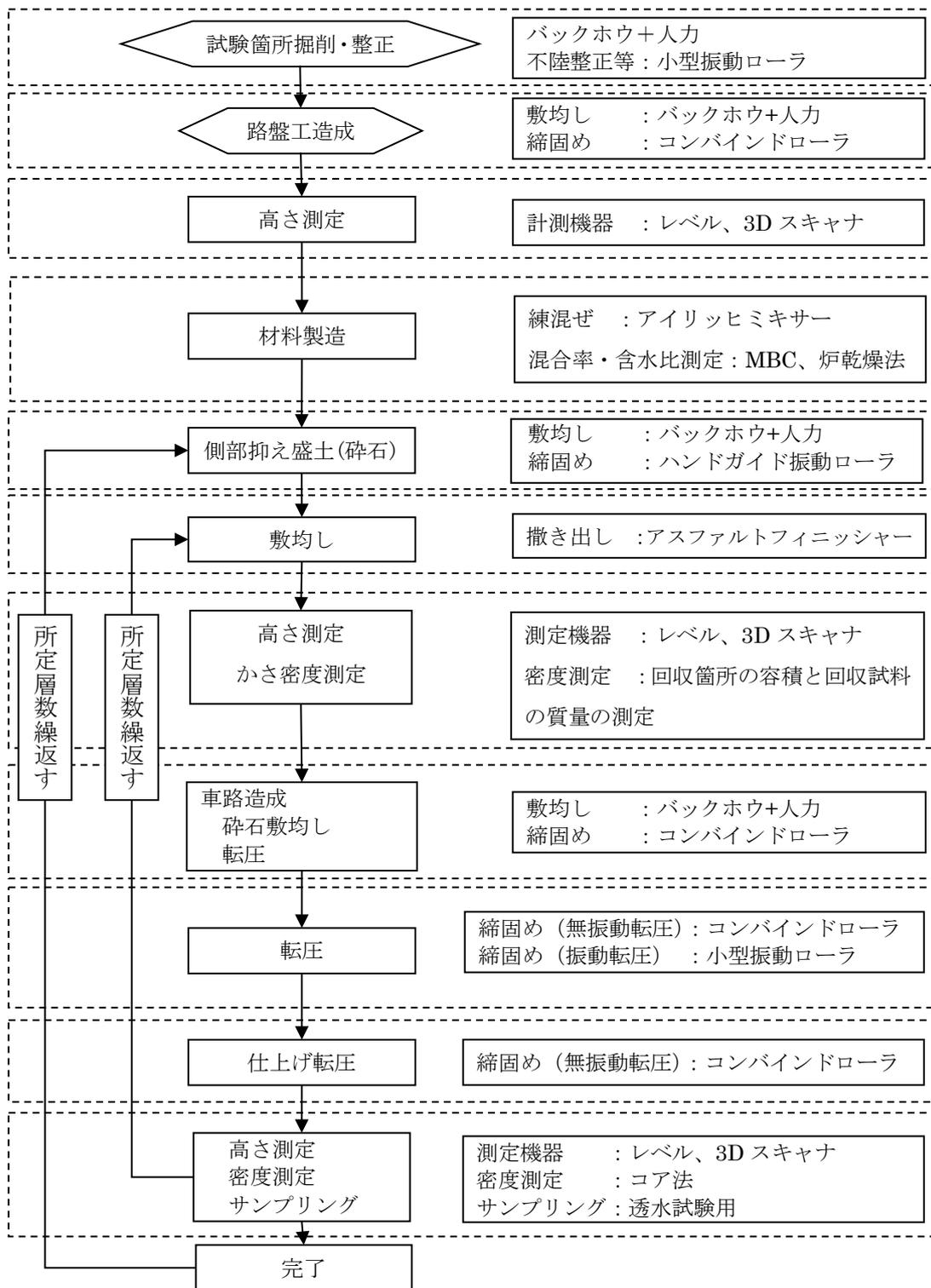


図 3.3-8 施工フロー

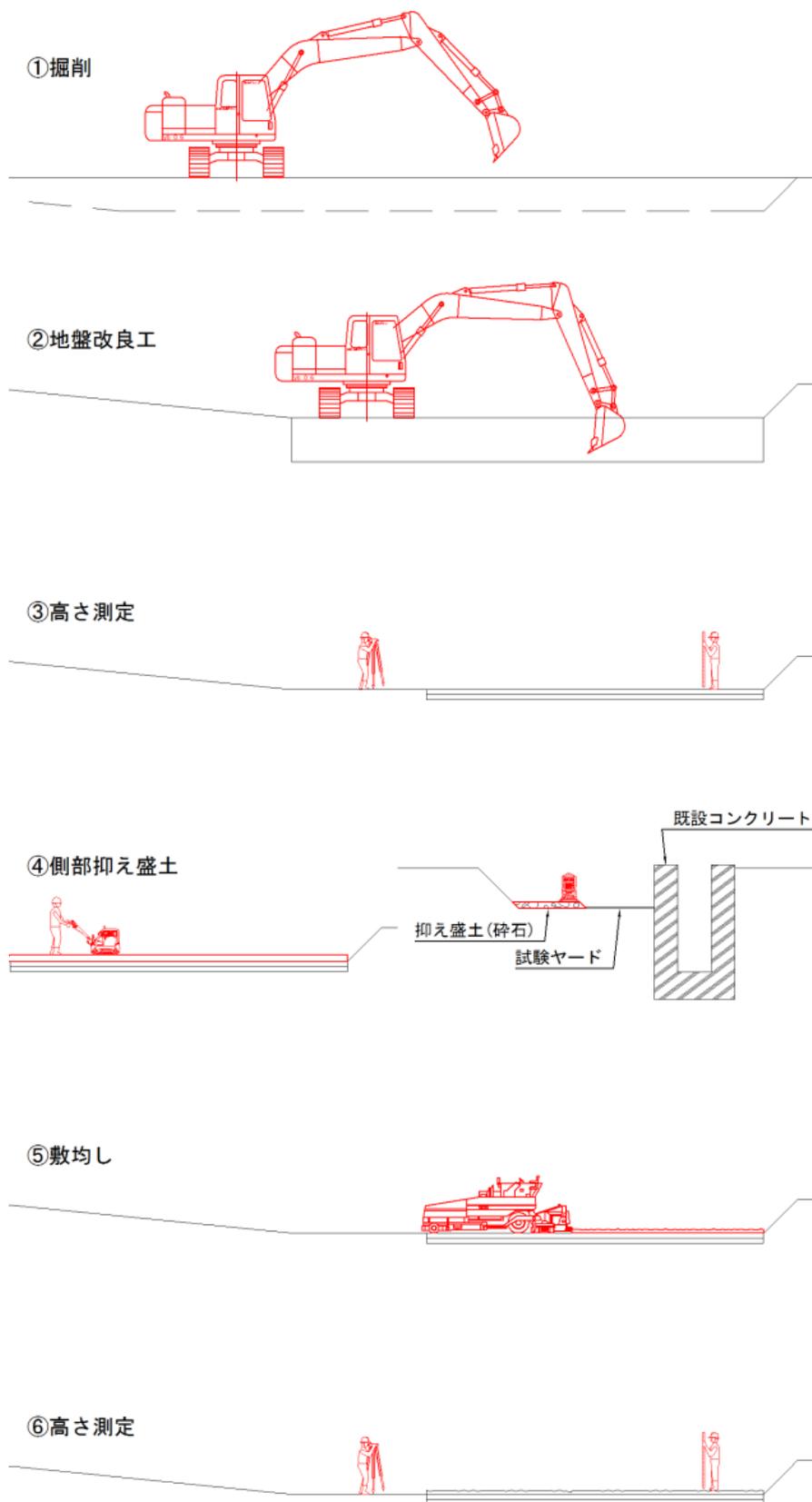


図 3.3-9 各施工段階における概要図 (1)

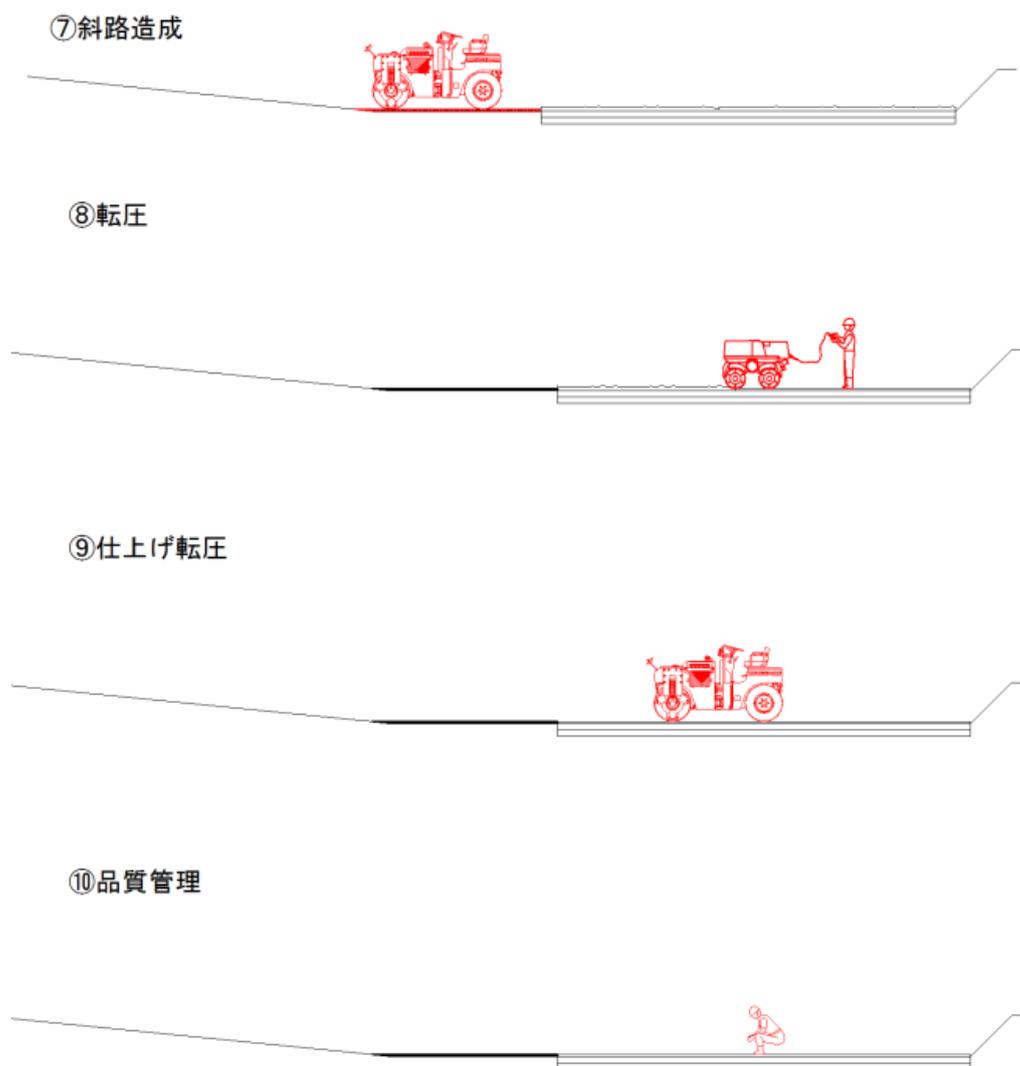


図 3.3-10 各施工段階における概要図 (2)

3.3.4.1 その他覆土 (抑え盛土)

敷均しに先立ち、側部に抑え効果を期待して、図 3.3-11 に示すようにその他覆土 (抑え盛土) を施工した。これは、振動ローラ等の起振力により、材料が側方に移動することを防ぐ目的とした。抑え盛土は 1 層 200mm 程度とし、施工試験の進捗に合わせて適宜増設した。抑え盛土の敷均しは 0.45m³ バックホウ及び人力で行い、締固めはハンドガイド振動ローラ等で行った。

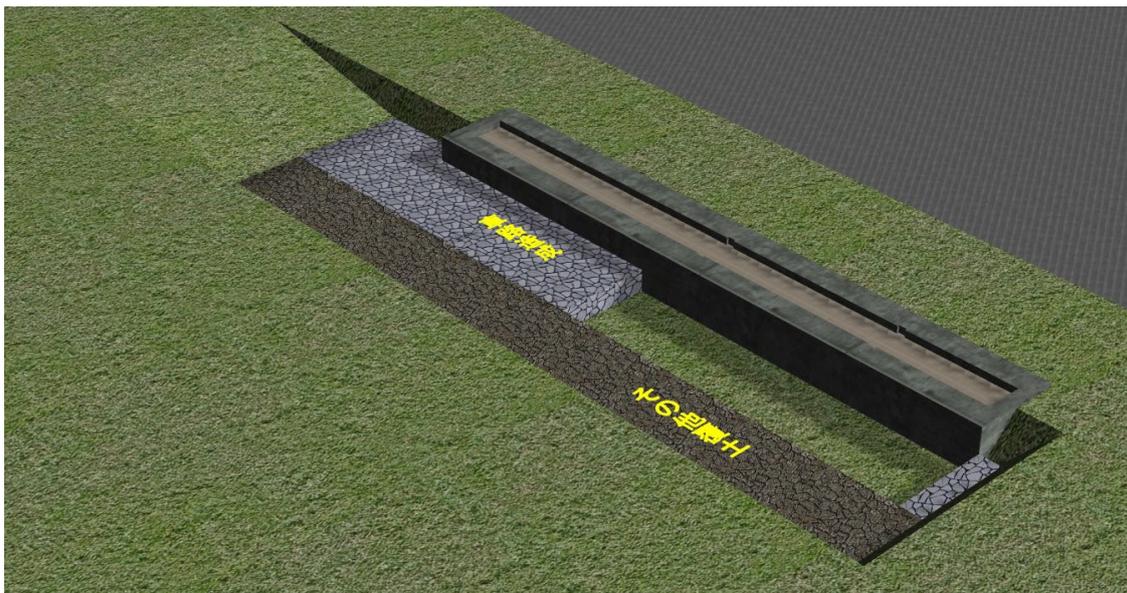


図 3.3-11 その他覆土 イメージ図

3.3.4.2 材料製造

施工試験に使用する材料（クニボンド混合土，混合率 30%，含水比 20% ($\omega_{opt}+4\%$)) は，アイリヒミキサーを用いて製造し，フレコンバッグに封入して試験施工箇所まで運搬した．材料建屋内で保管し，当日使用する分量を屋外試験ヤードに仮置した．

3.3.4.3 敷き均し

アスファルトフィニッシャーへの材料供給と敷均しの一連の作業は，下記の手順で行う．また，材料供給と敷き均しの状況を図 3.3-12 に示す．

- ① クレーンでフレコンバッグを吊り上げた状態で底部を開封する．
- ② 開封した材料は，ダンプトラックへ直接投入する．
- ③ ダンプアップし，アスファルトフィニッシャーへ材料を供給する．
- ④ 材料の敷均しは，アスファルトフィニッシャーを使用して行う．敷き均し厚さは 100mm とする．



図 3.3-12 材料供給・敷均し状況

3.3.4.4 車路造成

転圧時における重機の待避場所として図 3.3-13 に示すような車路を造成した。車路は碎石を敷均し転圧して造成した。車路造成は、施工の進捗に合わせて1層ごとに行うこととした。敷均しは0.45m³バックホウ及び人力で行い、締固めにはコンバインドローラを使用した。



図 3.3-13 造成後の車路

3.3.4.5 転圧

転圧は、各種の転圧機械で行う。予備転圧としてコンバインドローラによる転圧を実施し、本転圧は小型振動ローラによる振動転圧とする。小型振動ローラ等による転圧時は、図 3.3-14 に示すように、鉄輪間の踏み残しのないように複数レーンを走行させる。同図に示すように、小型振動ローラによる転圧の場合、2m 幅を踏み残しの無いように転圧するには 5 レーンの転圧が必要であり、5 レーンを往復で転圧することにより 2Pass の転圧回数とする。また、振動転圧終了後にコンバインドローラを利用して、転圧時の轍を消すための仕上げ転圧を行う。

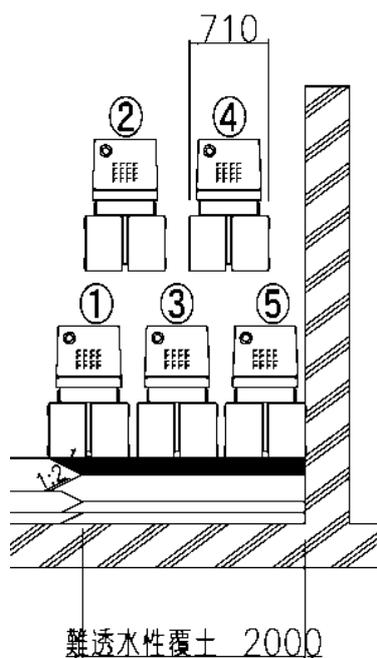


図 3.3-14 転圧走行レーン

3.3.5 施工パターン

施工は全 12 層実施した。はじめに 2 層の基盤層の施工を行った。その後、試験層を 10 層施工した。

事前に実施した予備施工試験により、敷均し厚を 100mm、転圧回数を 6 回と規定し、本番の試験では子の施工仕様で繰り返し施工を行い工法規定方式による施工管理の適用性を確認した。1 層当たりの敷均し厚さは 100mm 程度、仕上がり厚さは約 50mm 程度となった。基盤層を抜いた施工層は 10 層であるので試験施工層の厚さは約 500mm となる。図 3.3-11 に示したように、側部の抑え盛土を施工しながら、難透水性覆土を施工する。1 回当たりの抑え盛土の施工高さは施工後の高さが難透水性覆土の高さ+200mm となるようにする。抑え盛土施工後に難透水性覆土を 3 層（50mm×3 層=150mm）施工する。施工パターンのイメージ図を図 3.3-15 に示す。

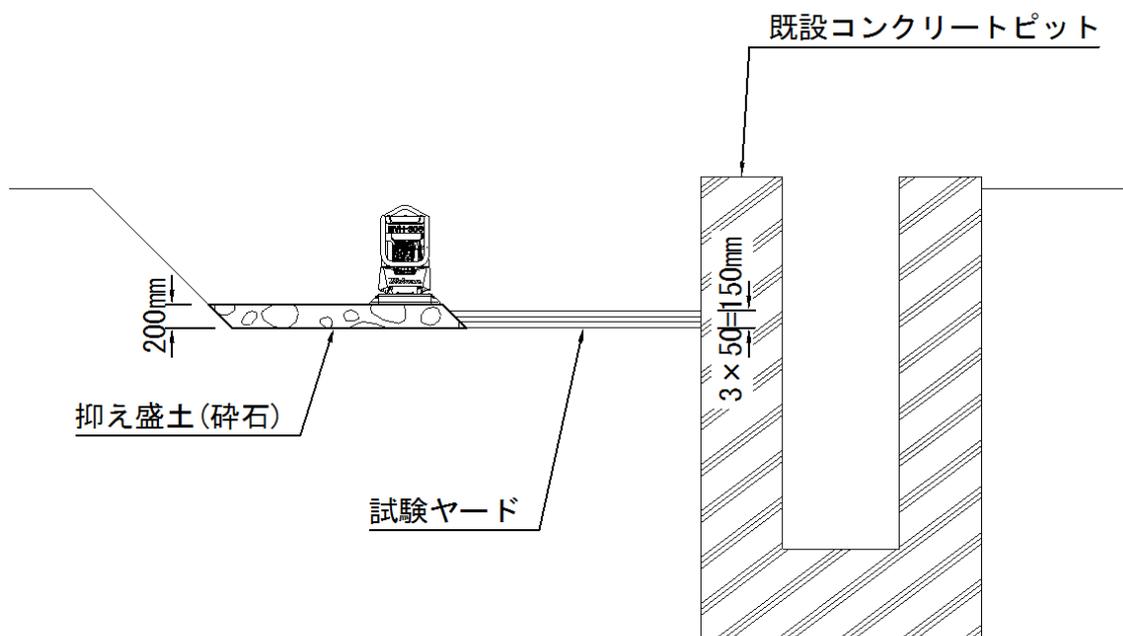


図 3.3-15 難透水性覆土と抑え盛土の施工パターン

3.3.6 品質管理方法

3.3.6.1 品質管理上の測定項目

施工時の品質管理項目の案を表 3.3-10 に示す。配合設定時に用いた材料と生産ロットが異なるため、納品検査の一環として、ベントナイトのメチレンブルー吸着量 (MBC) 測定、土粒子密度測定、砂の土粒子密度測定、粒度分布、ベントナイト混合土の締固め試験を行った。

練り混ぜ後のベントナイト混合土のベントナイト混合率を細粒分含有率で、含水比を炉乾燥法で測定した。細粒分含有率でベントナイト混合率を測定したのは、母材である砂の細粒分含有率が無視できるほど小さく、0.2%程度であったためである。

施工前後で施工面の高さを測定し、敷き均し後に測定するかさ密度から施工後乾燥密度を算出する。また、施工後の密度測定に関しては、サンプリングによる密度測定を行う。さらに 3D スキャナにより施工範囲の高さ測定を行い、測定された点群からレベル測量を行った箇所の高さを算出し、その算出された施工前後での高さから施工層厚を求め、かさ密度の測定値 (湿潤密度・含水比・乾燥密度) を用いて施工後の乾燥密度の算出を行う。その後、レベル測量との比較を行い、測定の確からしさを確認する。品質管理位置の案を図 3.3-16 ~ 図 3.3-20 に示す。また、図 3.3-21 にかさ密度の測定状況を、図 3.3-22 に 3D スキャナ測量の状況を示す。

表 3.3-10 品質管理項目

品質管理項目	数量
納品検査	
ベントナイト	
メチレンブルー吸着量 (MBC)	MBC 測定×6 回
土粒子密度測定	1 点
砂	
土粒子密度	1 点
粒度分布	1 回
ベントナイト混合土	
締固め試験	1 回
練り混ぜ後の品質確認	
ベントナイト混合率	細粒分含有率×1 回
含水比	183 点
出来高管理	
施工前	
レベル測量	50 点/層×10 層
3D スキャナ	2m×10m の施工範囲×10 層
敷き均し後	
3D スキャナ	2m×10m の範囲×10 層
施工後	
レベル測量	50 点/層×10 層
3D スキャナ	2m×10m の範囲×10 層
品質管理	
敷き均し後	
かさ密度測定	4 箇所/層×10 層
施工後	
シンウォールサンプリングによる密度試験	20 箇所/層×10 層
性能確認	
透水試験	8 箇所/層×5 層 (サンプリング ; 16 箇所/層)

※3D スキャナのデータを用いて高さ変化より転圧後の乾燥密度の推定を実施

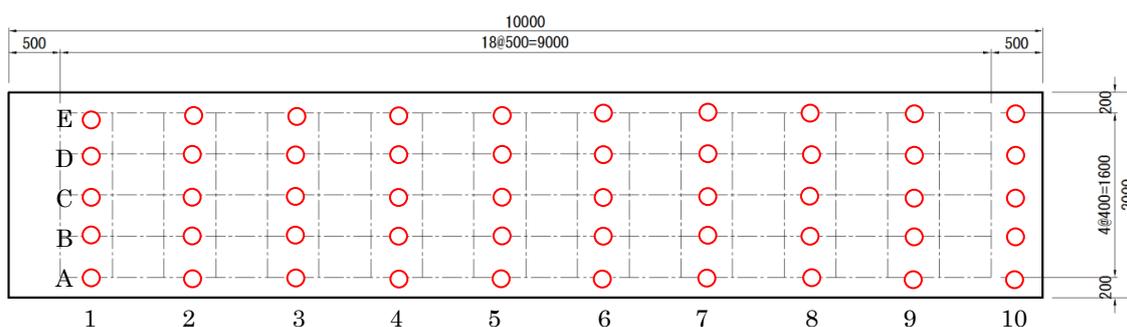


図 3.3-16 品質管理 (レベル測量および 3D スキャナの高さ算出位置)

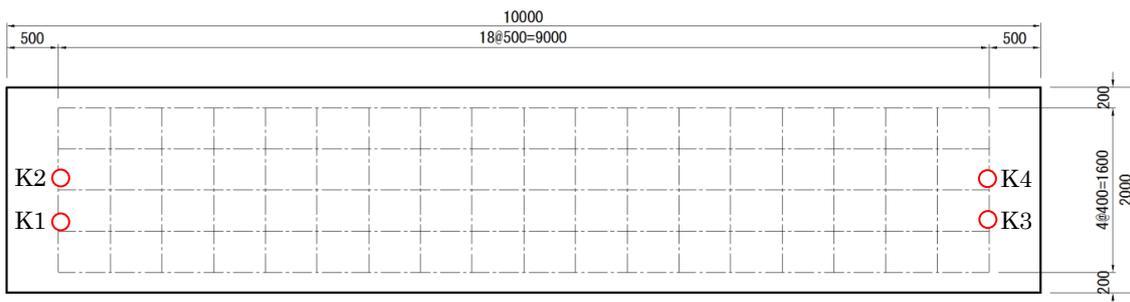


図 3.3-17 品質管理 (かさ密度測定)

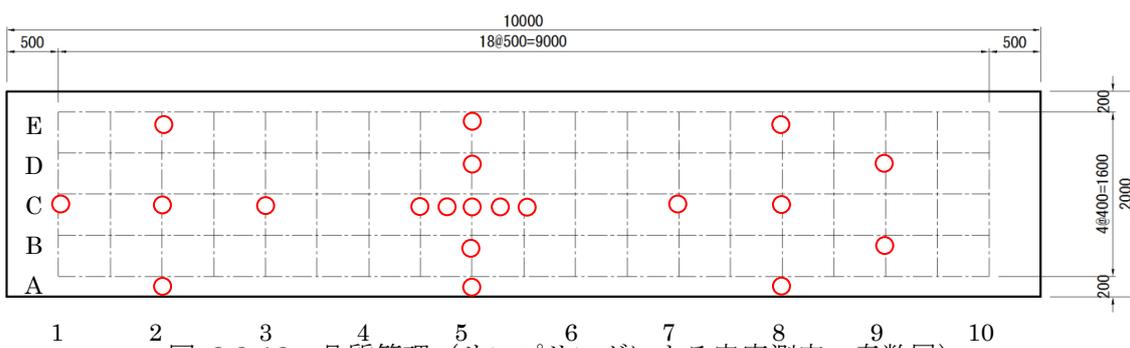


図 3.3-18 品質管理 (サンプリングによる密度測定 ; 奇数層)

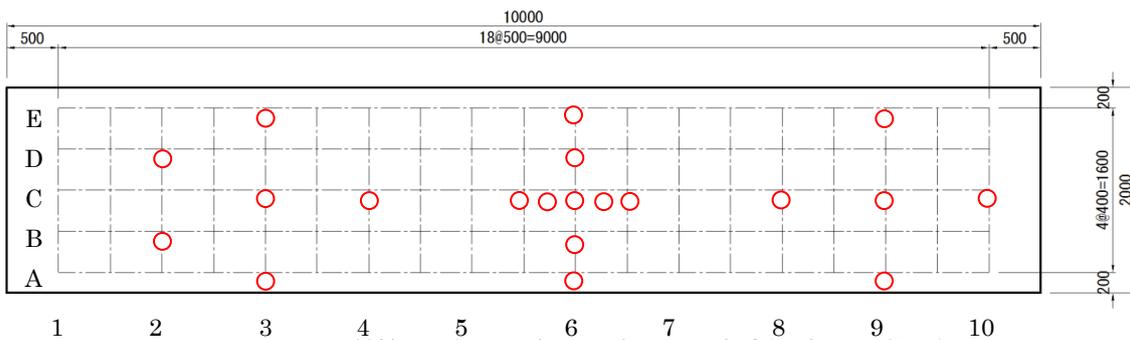


図 3.3-19 品質管理 (サンプリングによる密度測定 ; 偶数層)

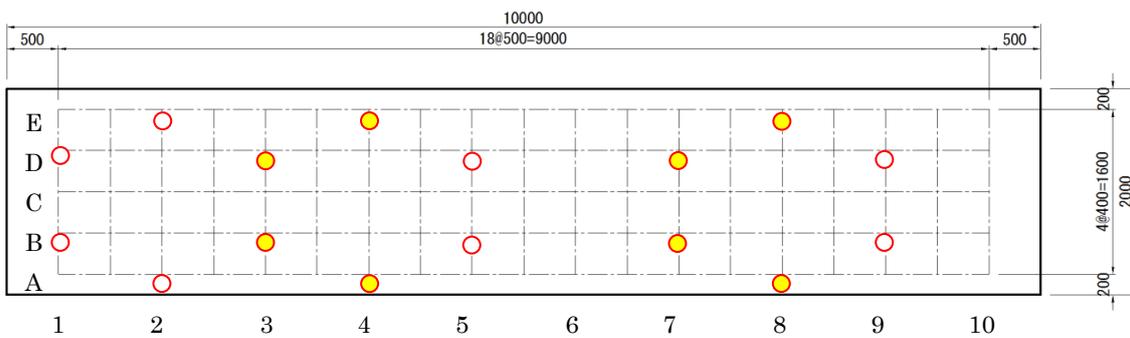


図 3.3-20 品質管理 (透水試験サンプリング位置 ; 偶数層, 黄色は予備試料)



図 3.3-21 かさ密度測定状況



図 3.3-22 3D スキャナによる測量状況

3.3.6.2 3D スキャナを用いた高さ測定

使用した3Dレーザースキャナーは、表 3.3-11に示すRIEGL 社製地上設定型レーザースキャナーを使用した。最遠箇所におけるレーザーの入射角 5° 、 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の範囲内に最低でも5点程度の母数が確保できる位置に設置した。表 3.3-11中の測定精度は、5点測定した時の平均値に対する測定誤差を誤差伝播の法則を適用して求めた値である。3Dレーザースキャナーと測点間の距離が近くなると $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の範囲内に5点以上のデ

ータを採取するので、最遠箇所での測定誤差が最も大きくなる。そのため斜距離での測定精度を±5.4mmとすると、入射角5°の時の鉛直方向の測定精度は5.4mmに $\sin 5^\circ$ を乗じた±0.5mmとなる。

表 3.3-11 3D スキャナの仕様

反射率 $\geq 80\%$ の自然物ターゲット	200m まで
反射率 $\geq 20\%$ の自然物ターゲット	60m まで
最短距離	1m
測距精度	± 5.4mm (斜距離)
高さ方向の測定精度	0.5mm
測定レート	12000 点/秒 低速スキャン 8000 点/秒 高速スキャン
スキャンニング範囲	0 ~ 90°× 0 ~ 360°

3.3.6.3 乾燥密度・含水比の測定方法

(1) かさ密度測定およびコアカッター法

敷均し後および転圧後の湿潤密度、含水比、乾燥密度は JGS 1613-2012 「コアカッターによる土の密度試験方法」⁹⁾に準拠する。本研究では、コアカッターによる土の密度試験方法を適用するのは二つの測定対象があるのでここでその違いを説明する。

一つ目は、転圧前の敷均し後のかさ密度（以下、かさ密度）を測定する方法である。かさ密度の測定には内径 150 mm、高さ 150 mm の塩ビ製の薄肉円筒を使用する。二つ目は転圧後の乾燥密度の測定（以下、こちらをコアカッター法とする）である。転圧後のコアカッター法には直径 75 mm、高さ 50 mm 鋼製の薄肉円筒を用いた。薄肉円筒内の試料を回収しノギス法で体積を、電子天秤等で質量を測定し湿潤密度を測定する。その後、炉乾燥後に測定した含水比と湿潤密度より乾燥密度を求める。

(2) 3D スキャナのデータを用いた方法

現場の出来形管理の一つとして、測量で転圧前後の表面高さの変化を測定する。本研究では、この高さの測量に 3D スキャナを用い、面的に分布した点群データを取得する。これにより転圧前後の高さ変化より体積変化を求める。図 3.3-23 に転圧前後の体積変化に伴う密度変化の概念を示す。敷き均された材料の密度は数式 3.3-1 のように表され、転圧後に数式 3.3-2 のように大きくなる。ここで、転圧後の厚さ d_c と敷均し後の厚さ d_r の比を数式 3.3-3 のように層厚変改率とする。この時、施工に起因するばらつき、すなわち材料製造時の含水比のばらつきや敷均し時のかさ密度のばらつき、転圧時に転圧ローラの進行方向に材料が引き伸ばされることが、転圧後の乾燥密度に影響する。既往の検討で示されている断面積の変化率 $\eta^{10)}$ は、乾燥密度に与える施工に起因する影響が加わったものであ

ると考えられるため、本論文では、密度変化率 μ と定義する。 μ を用いて転圧前後の乾燥密度の関係を示すと、数式 3.3-4 のようになる。ここで、 ρ'_{comp} は施工の影響を考慮した転圧後の乾燥密度とする。 μ は図 3.3-24 の模式図のように x と反比例する関係となるので x を用いて数式 3.3-5 のように表すことができる。施工の影響を考慮した転圧後の乾燥密度 ρ'_{comp} は数式 3.3-2, 数式 3.3-4, 数式 3.3-5 より数式 3.3-6 のように表せる。

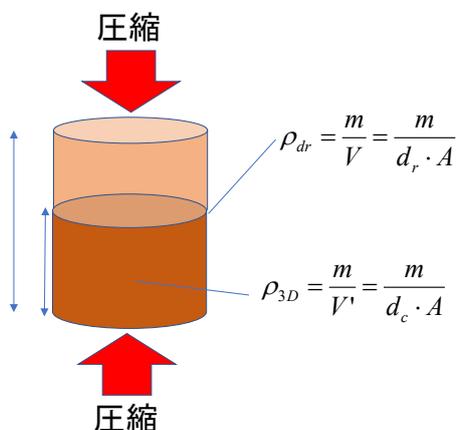


図 3.3-23 転圧時の密度変化の概念図

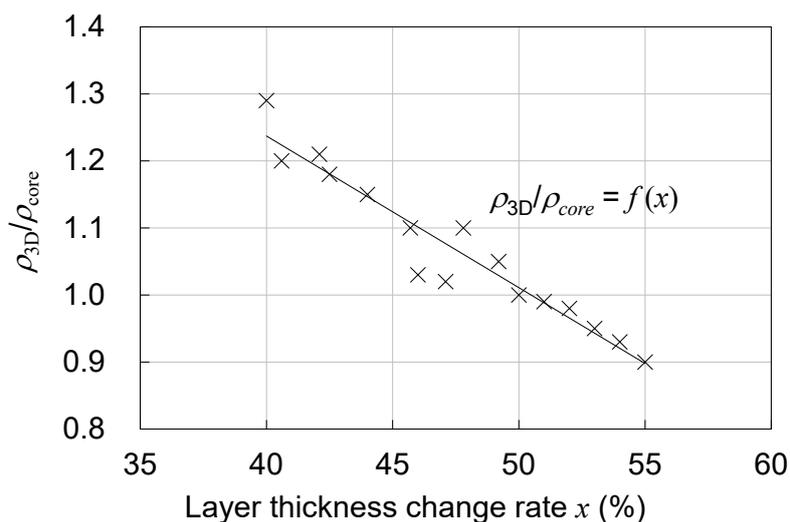


図 3.3-24 層厚変化率 x と密度変化率 μ の関係の概念図

$$\rho_{d_r} = \frac{m}{V} = \frac{m}{d_r \cdot A} \tag{数式 3.3-1}$$

$$\rho_{comp} = \frac{m}{d_c \cdot A} = \frac{\rho_{d_r} \cdot d_r \cdot A}{d_c \cdot A} = \frac{\rho_{d_r} \cdot d_r}{d_c} = \frac{\rho_{d_r}}{x} \tag{数式 3.3-2}$$

$$x = \frac{d_c}{d_r} \quad \text{数式 3.3-3}$$

$$\rho_{\text{comp}} = \mu \rho'_{\text{comp}} \quad \text{数式 3.3-4}$$

$$\rho'_{\text{comp}} = \frac{\rho_{\text{comp}}}{\mu} \quad \text{数式 3.3-4}$$

$$\mu = \frac{\rho_{\text{comp}}}{\rho'_{\text{comp}}} = ax + b \quad \text{数式 3.3-5}$$

$$\rho'_{\text{comp}} = \frac{\rho_{\text{comp}}}{\mu} = \frac{\rho_{d_r}}{\mu x} = \frac{\rho_{d_r}}{ax^2 + bx} \quad \text{数式 3.3-6}$$

ここに、 ρ_{d_r} ：敷均し後のかさ密度(乾燥密度換算)(Mg/m³)、 ρ_{comp} ：換算乾燥密度 (Mg/m³)、 ρ'_{comp} ：施工の影響を考慮した転圧後の乾燥密度 (Mg/m³)、 x ：見かけの層厚変化率、 d_r ：敷均し後の厚さ (m)、 d_c ：転圧後の厚さ (m)、 a および b ：係数

3.3.7 施工試験結果

3.3.7.1 使用材料の事前確認試験

(1) ベントナイト

表 3.3-12 に施工試験に使用したメチレンブルー吸着量の測定結果を示す。納品された材料の試験成績書の値 (122mmol/100g) と納品後に測定した値 (123mmol/100g) とで有意な差は無かった。また、土粒子密度を測定した結果は 2.659Mg/m³であった。

表 3.3-12 クニボンドRWのメチレンブルー吸着量測定結果

ミルシート		測定値	
番号	MBC	番号	MBC
1	121	1	125
2	121	2	120
3	122	3	122
4	122	4	122
5	122	5	124
6	121	6	123
7	123	平均値	123
8	122	最大値	125
9	121	最小値	120
10	123		
11	123		
12	122		
13	123		
14	124		
15	121		
16	126		
17	119		
18	120		
19	120		
20	120		
平均値	122		
最大値	126		
最小値	119		

(2) 砂

施工試験に使用した砂の土粒子密度は 2.73Mg/m^3 であった。表 3.3-13 に試験施工に使用した砂の材料特性を、図 3.3-25 に粒径加積曲線を示す。

表 3.3-13 施工試験に使用した砂の材料特性

産地	青森県三沢市
土粒子密度 (Mg/m^3)	2.730
自然含水比 (%)	3.2
細粒分含有率 (%)	0.2
最大粒径 (mm)	4.8
均等係数 U_c	4.2
曲率係数 U'_c	0.85

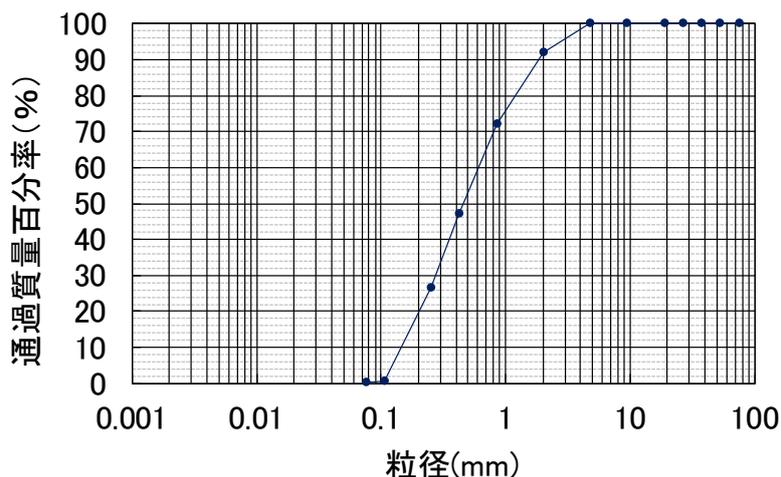


図 3.3-25 使用した砂の粒径加積曲線

(3) ベントナイト混合土の締固め試験

図 3.3-26 にベントナイト混合土 (クニボンド混合率 30%) の締固め試験結果を示す。最適含水比は 15.0% で、最大乾燥密度は 1.807Mg/m^3 であった。

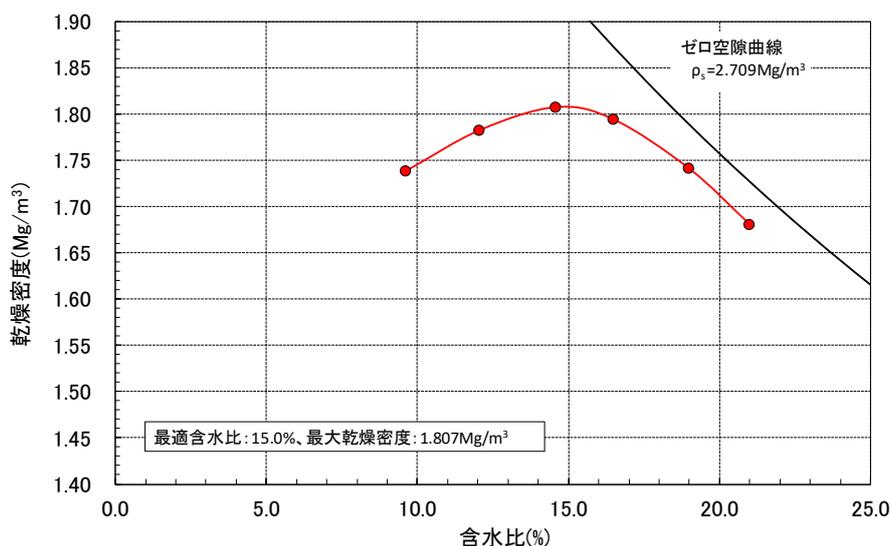


図 3.3-26 施工試験に使用した材料を用いた締固め試験結果

3.3.7.2 練り混ぜ後のベントナイト混合土

練り混ぜ後のベントナイト混合土の含水比・混合率の測定結果を表 3.3-14 に示す。含水比は $19.0\% \pm 0.5\%$ 、混合率は $29.9 \pm 0.6\%$ 以内であり、いずれも目標を達成した。練り混ぜ後のベントナイト混合土の混合率は細粒分含有率を測定することで求めた。細粒分含有率でベントナイト混合率を求めたのは、母材である砂の細粒分含有率が無視できるほど小さ

く、0.2%程度であったためである。

表 3.3-14 練り混ぜ後のベントナイト混合土の含水比・混合率

含水比 w (%)	細粒分含有率 F_c (%)
18.8	29.8
18.7	29.5
18.5	29.6
19.1	29.5
19.2	30.0
19.0	29.8
19.0	29.8
19.0	29.8
18.9	29.9
19.1	30.2
18.8	30.0
18.7	30.1
18.9	29.9
19.0	29.6
19.0	30.1
19.3	29.6
19.1	29.9
19.0	30.3
19.1	30.2
19.0	30.6

含水比	
平均値	19.0
標準偏差	0.18
最大値	19.3
最小値	18.5
標本数	20

細粒分含有率	
平均値	29.9
標準偏差	0.28
最大値	30.6
最小値	29.5
標本数	20

3.3.7.3 敷均し後のかさ密度

転圧前、すなわち敷均し後のかさ密度（乾燥密度換算） ρ_{dr} の測定結果を図 3.3-27に示す。かさ密度は0.77~0.92 Mg/m^3 の範囲に分布し、平均値は0.86 Mg/m^3 であった。

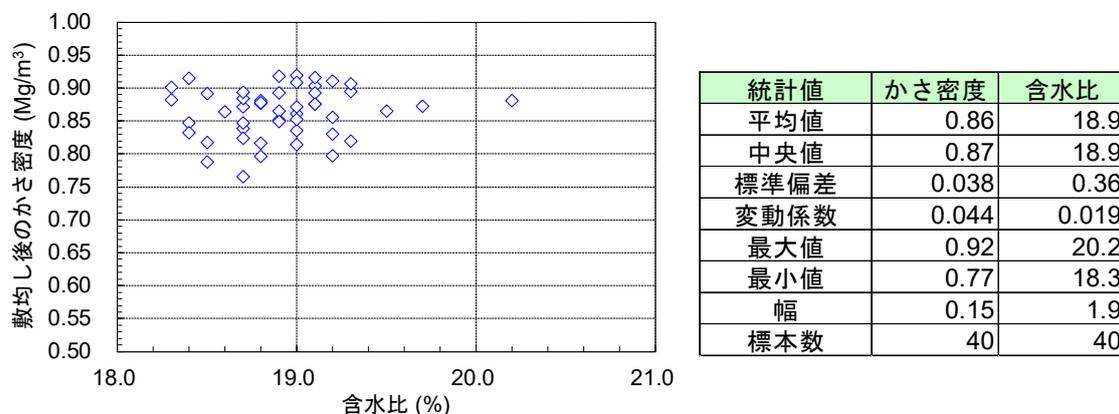


図 3.3-27 敷均し後のかさ密度の測定結果

3.3.7.4 コアカッター法による測定結果

測定は、図 3.3-18 および図 3.3-19 に示したように奇数層と偶数層とで採取位置を変えて合計 200 点実施した。図 3.3-26 に乾燥密度と含水比の測定結果を追加したものを図

3.3-28 に示す。また、乾燥密度と含水比のヒストグラムもそれぞれ図 3.3-29 および図 3.3-30 に示す。施工管理目標値を満足した施工ができていることを確認できた。図 3.3-28 には統計量の一覧表も併記した。

コアカッター法で測定後の試料を用いてベントナイトの混合率を測定した。測定結果を図 3.3-31に示す。30.0±2.0%の範囲内であり、大部分は29.0~31.0%程度であることを確認できた。

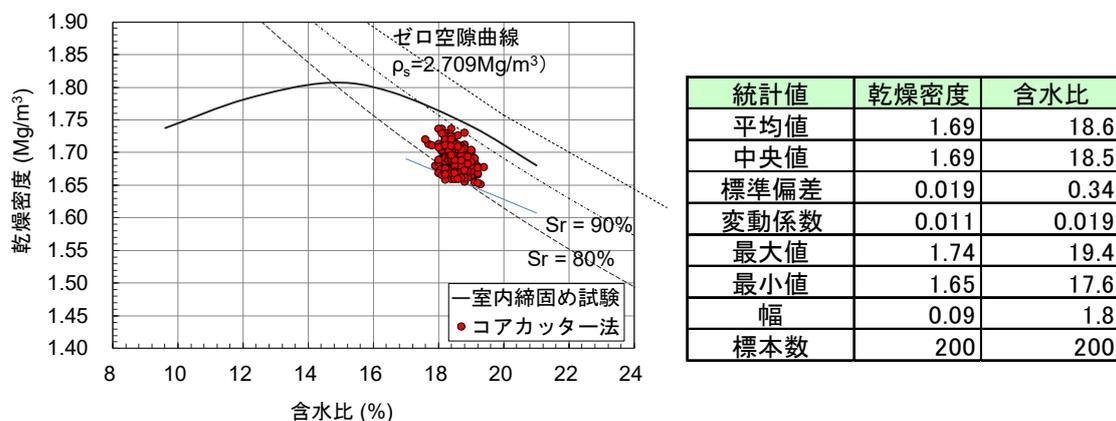


図 3.3-28 コアカッター法による密度測定の結果（乾燥密度・含水比）

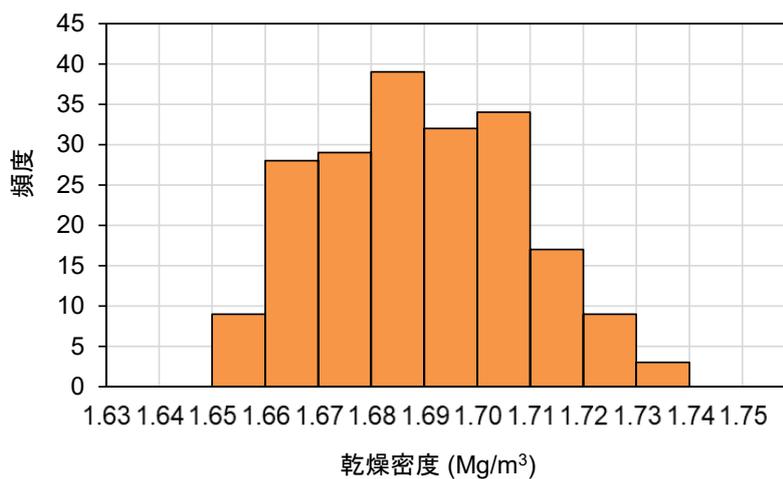


図 3.3-29 コアカッター法による乾燥密度測定結果（ヒストグラム）

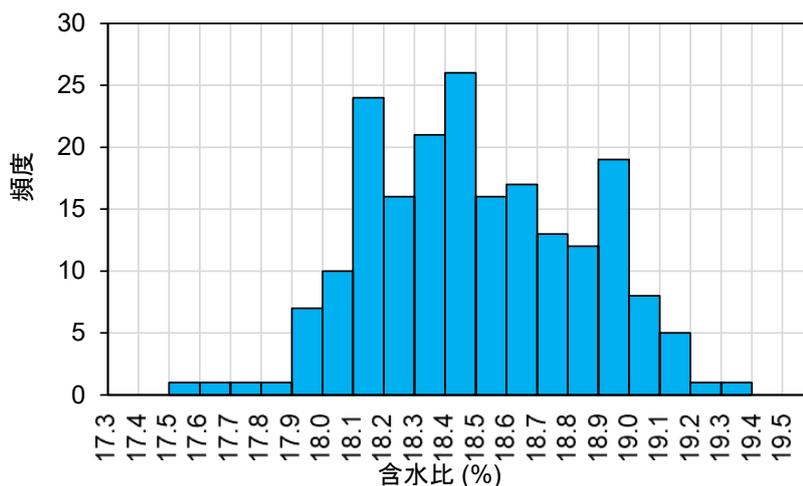


図 3.3-30 コアカッター法による含水比 (ヒストグラム)

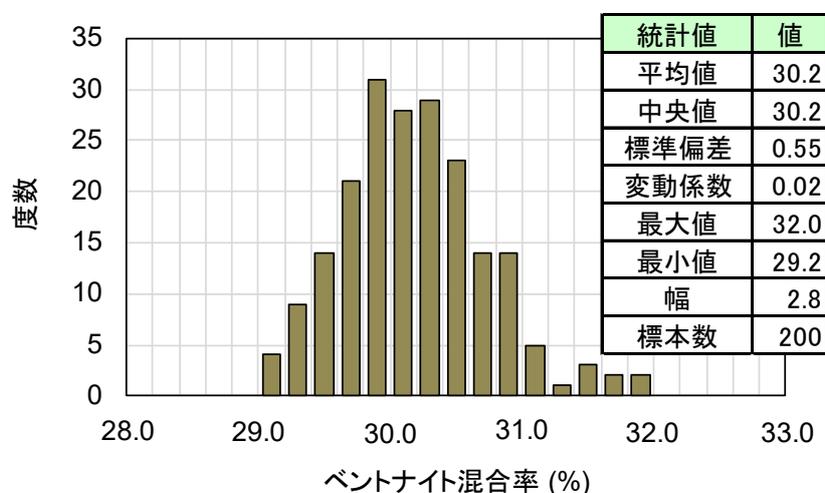


図 3.3-31 転圧後に回収した資料を用いた細粒分含有率の測定結果

3.3.7.5 3D スキャナのデータを用いた方法の測定結果

転圧後の層厚 d_c について、3D スキャナの測定結果のうち、レベル測量を行った箇所を抽出して比較した。表 3.3-15 に各層のレベル測量結果と 3D スキャナ測定結果との差分を、図 3.3-32 に各層のレベル測量結果と 3D スキャナ測定結果との差分をそれぞれ示す。レベル測量と 3D スキャナの差分は測定点ごとで比較すれば最大で 10mm 程度の乖離が生じた。3D スキャナでは転圧ローラの轍や表面のわずかな不陸も測定値に反映するのでこの程度の差異が生じたと考えられる。全体の平均で考慮するとほとんど差異が無い結果となった。図 3.3-32 に示した各層の層厚の平均値は 3D スキャナの測量とレベル測量の差はほとんどないと判断した。

表 3.3-15 各層のレベル測量結果と 3D スキャナ測量結果との差分

統計値	1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	7層目	8層目	9層目	10層目	全体
平均値	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	-0.003	-0.002	-0.001	0.001	0.002	0.000
中央値	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	-0.002	-0.001	-0.002	0.000	0.001	0.000
標準偏差	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.003
最大値	0.005	0.004	0.005	0.005	0.006	0.003	0.002	0.013	0.005	0.007	0.013
最小値	-0.010	-0.005	-0.004	-0.004	-0.004	-0.007	-0.006	-0.006	-0.003	-0.002	-0.010
幅	0.015	0.009	0.009	0.009	0.010	0.010	0.008	0.019	0.008	0.009	0.023
標本数	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	500

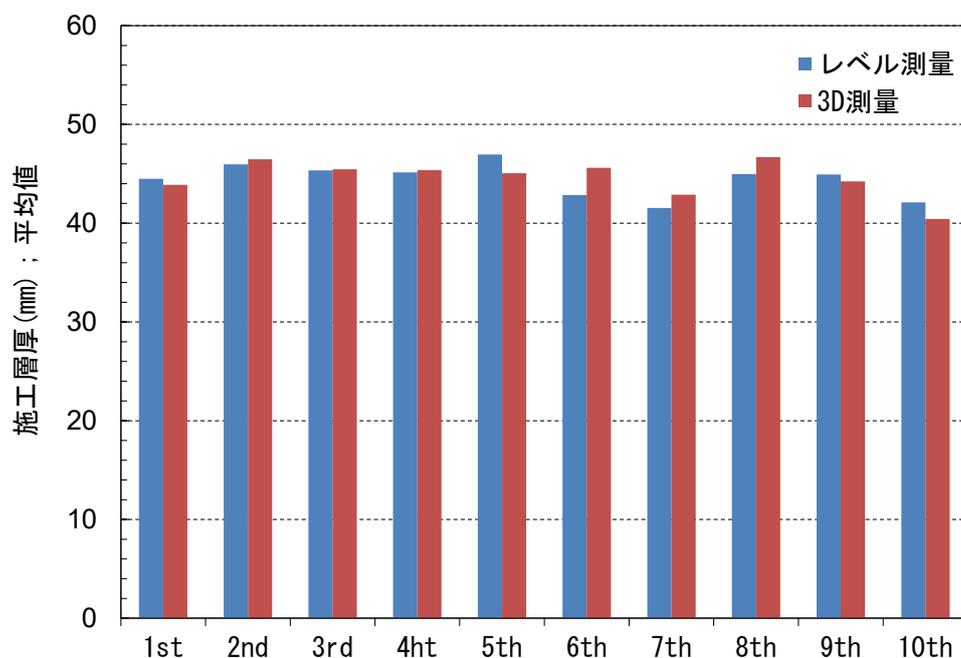


図 3.3-32 レベル測量と 3D スキャナ測量による各層の平均層厚の比較

転圧前後の高さの測定値 d_r 、 d_c およびコアカッター法で得られた乾燥密度 ρ_{core} を施工の影響を考慮した転圧後の乾燥密度 ρ'_{comp} とみなして数式 3.3-5 に適用して整理した結果を図 3.3-33 に示す。

見かけの層厚変化率 x が小さいほど、すなわち転圧後に大きく圧縮されるほど、 $\rho_{comp}/\rho_{core}=\mu$ は大きくなる傾向となる。図 3.3-33によると密度変化率 μ の平均値は1.037で、密度の変化が全て断面積変化によるものと仮定すると、3.7%程度面積が増加したといえる。3Dスキャナの測定結果のうち、3層目の各距離における断面を図 3.3-34に示す。転圧により施工面積が変化していることが観測された。施工延長2mごとの短冊の面積を計算し、面積変化率を計算した結果を表 3.3-16に示す。抑え盛土の転圧が不足しているケースで横断方向への施工幅の増加が見られた。全体での施工面積の増加は1.2%程度であり、密度変化率 μ と差が生じた。これは、施工に起因する局所的な層厚変化や数均し時の密度のばらつきの影響と考えられる。

図 3.3-33 から得られた数式 3.3-5 の回帰式の係数 a, b はそれぞれ $a=-0.0228, b=2.1525$ となった。この係数と敷均し後の乾燥密度 ρ_{dr} (平均値の 0.86 Mg/m^3 を採用) を数式 3.3-6 に代入し、乾燥密度を求めた。その結果を図 3.3-35 に示す。本方法では含水比の測定ができないので、含水比の値は同じ箇所で測定したコアカッター法の値を適用した。乾燥密度は、コアカッター法と比較して平均値・中央値は同じ値であったが、分布範囲が 0.04 Mg/m^3 だけ大きく、標準偏差も大きくなった。変動係数は 3D レーザースキャナーによる方法の方が大きくなった。

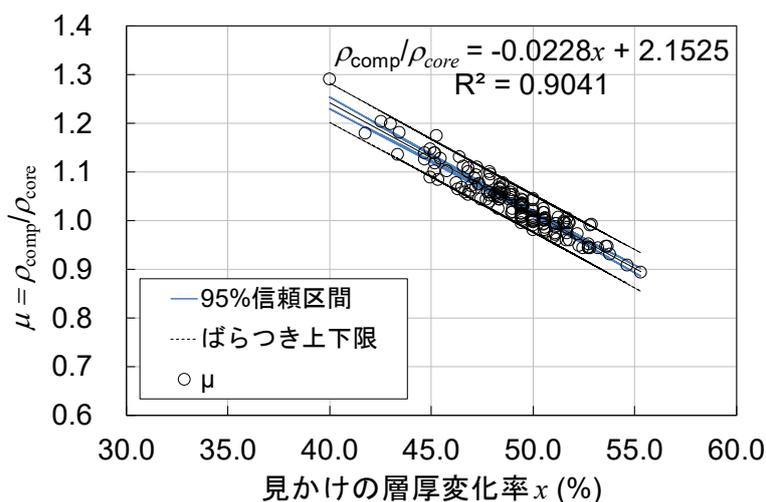


図 3.3-33 見かけの層厚変化から締め後の乾燥密度を推定する相関関係

表 3.3-16 各層の施工面積の変化と面積増加率

施工層	施工面積 (m ²)		差(m ²)	増加率 (%)
	敷均後	転圧後		
1	24.554	23.515	0.761	3.10
2	途中で抑え盛土追加によりデータ整理より除外			
3	26.353	27.218	0.865	3.28
4	24.709	24.912	0.203	0.82
5	24.506	24.523	0.017	0.07
6	24.421	24.767	0.346	1.42
7	24.029	24.046	0.017	0.07
8	23.652	23.675	0.023	0.10
9	23.188	23.431	0.243	1.05
10	23.003	23.100	0.097	0.42
平均	24.268	24.554	0.286	1.18

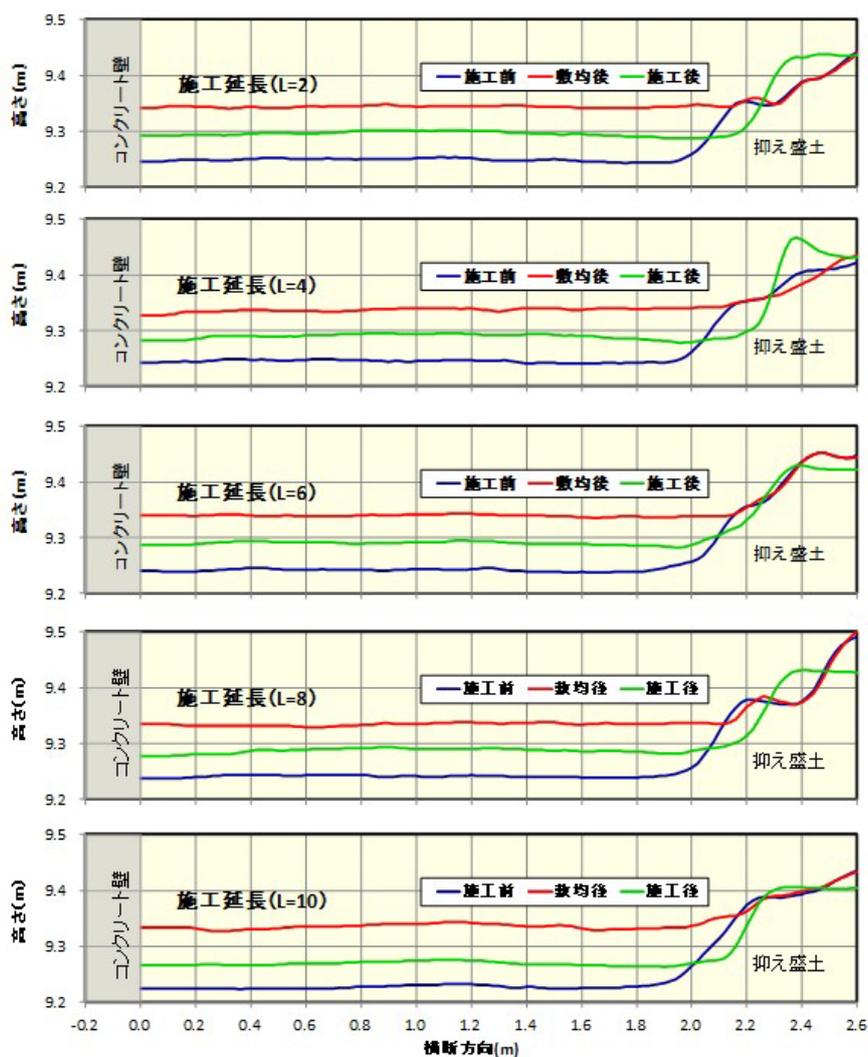


図 3.3-34 横断方向の施工幅の変化の例 (3層目)

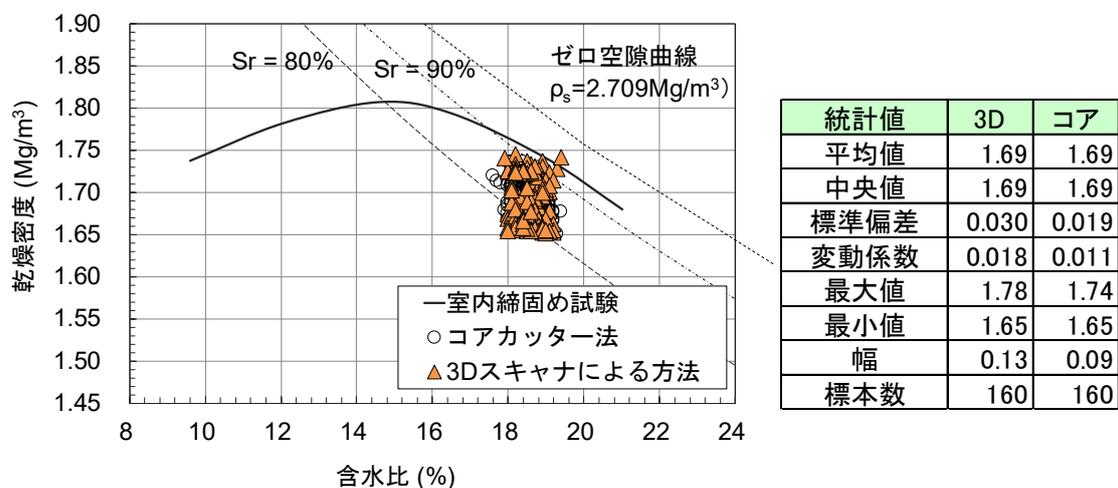


図 3.3-35 3D スキャナによる方法の推定結果

コアカッター法と3D スキャナによる方法の両方で乾燥密度を求めた測定点を抽出し、二つの方法から求めた乾燥密度の比較を行った。その結果を図 3.3-36 に示す。二つの方法で乾燥密度が一致すれば、図 3.3-36 の実線上に点がプロットされるが、実線よりも±0.05Mg/m³程度の幅を持って分布しているのが分かる。これは二つの方法の差異は±0.05 Mg/m³程度の差が生じる可能性があることを示す。

図 3.3-35 の一覧表に示したように、標準偏差・変動係数が3D スキャナによる方法の方が大きく、測定値の分布幅がコアカッター法：1.65～1.74Mg/m³に対し3D スキャナ：1.65～1.78Mg/m³と、コアカッター法よりも若干大きくなった。また、平均値・中央値は二つの方法で一致していることがわかった。このことより、3D スキャナのデータを活用して乾燥密度の推定が精度よくできることが分かった。

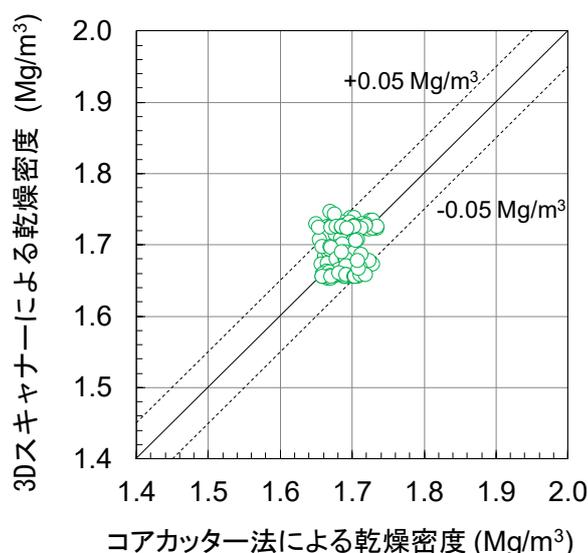


図 3.3-36 3D スキャナによる方法とコアカッター法との乾燥密度の比較

3.3.7.6 施工後回収試料を用いた透水試験

図 3.3-20 に示した箇所から試料を採取し、室内で透水試験を実施した。3.1 節と同様に透水試験は地盤工学会基準「低透水性材料の透水試験方法」(JGS 0312)⁴⁾に準拠した。配合設定時の透水試験と比較するため、施工後に採取した試料を用いた透水試験結果¹¹⁾を図 3.2-9 に追加した。その結果を図 3.3-37 に示す。

回収した試料は締固め規定値 $C=95\%$ 以上を満足しており、概ね締固め規定値 $C=97\%$ 程度である。透水試験で得られた透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を全て満足しており、室内で圧縮成形した供試体を用いた結果よりも施工後回収した試料を用いた試験結果の方が透水係数は小さめとなった。これは、ベントナイトの生産ロットの違いにより、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 C_m が施工試験に用いたものの方が高かったこと(配合設定試験時： $C_m=78.9\%$ ，施工試験時： 87.9%) が要因であると考えられる。

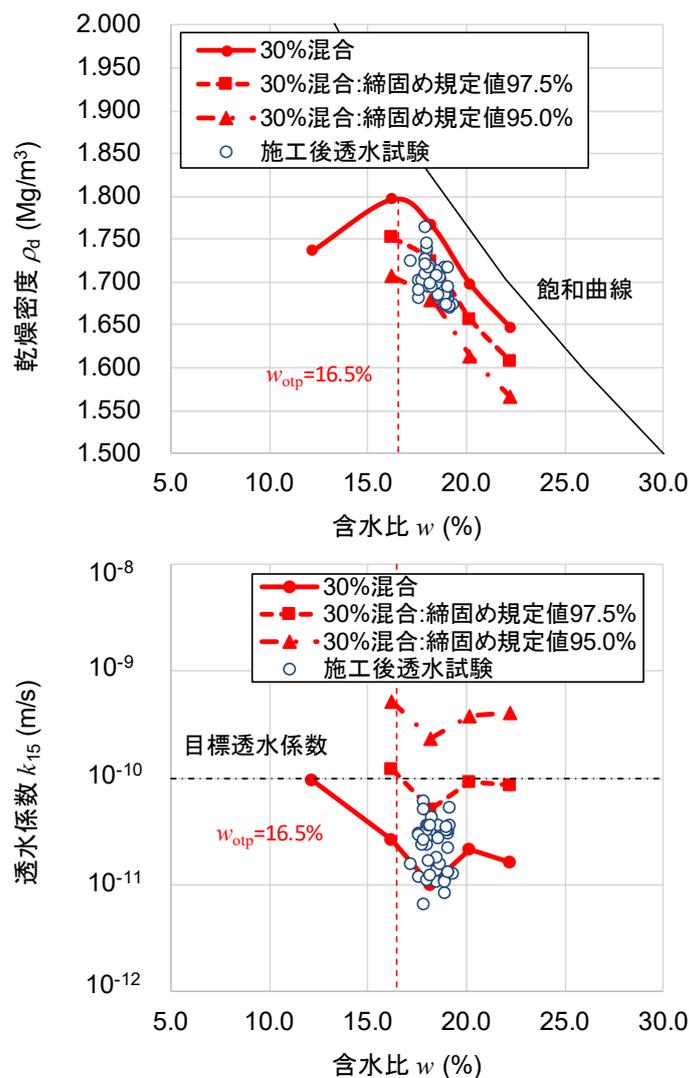


図 3.3-37 施工後回収試料を用いた締固め曲線と透水試験結果の関係

3.4 3章のまとめ

本章では、施工試験に資する材料の配合設計の仕方および施工試験時のも管理目標値の設定の仕方を説明し、暫定的ではあるものの施工時の管理目標を設定した。

設定した施工管理目標を満たすための施工方法、すなわち練り混ぜ方法・敷均し方法・転圧方法の概要、施工後の品質測定の方法についてまとめた。本研究での施工方法のうち、敷き均し方法はアスファルトフィニッシャーを用いる点で通常の土工事と大きく異なることが特徴である。アスファルトフィニッシャーを用いることで、敷均し後の材料の密度と厚さが均一にすることが可能となった。

このような施工方法で施工した結果は、各施工段階（練り混ぜ後・敷均し後・転圧後）における品質測定での測定結果としてまとめた。練り混ぜ後の材料の含水比のばらつきは

19.0±1.0%以内、ベントナイトの混合率で30.0±1.0%以内に収めることができ、均一な材料製造が可能であることが分かった。また、転圧後の乾燥密度は $1.69\pm 0.05\text{Mg/m}^3$ と大きくばらつきのない構造物が施工できた。

施工時の品質管理の一方法として、3D スキャナのデータを用いた乾燥密度の測定方法の適用性をコアカッター法との測定結果の比較より行った。その結果、コアカッター法の測定結果と大きく異ならず、3D スキャナのデータを活用して乾燥密度の推定が精度よくできることが分かった。

また、本研究の対象土構造物である浅地中ピット処分施設における低透水層の要求性能である透水性について、施工後に回収した試料を用いた透水試験の結果についてまとめた。その結果、透水係数は $1.0\times 10^{-10}\text{m/s}$ を全て満足しており、室内で圧縮成形した供試体を用いた結果よりも施工後回収した試料を用いた試験結果の方が透水係数は小さめとなった。これは、ベントナイトの生産ロットの違いにより、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 C_m が施工試験に用いたものの方が高かったこと（配合設定試験時： $C_m=78.9\%$ 、施工試験時： 87.9% ）が要因であると考えられる。

本研究での施工方法では、乾燥密度や含水比がどの程度のばらつきで施工できるのかが分かった。回収試料を用いた透水試験の結果より、要求性能を満足できることを確認できた。これらの結果より、転圧機械と転圧幅・敷均し厚さ・転圧回数を規定して施工を複数層繰り返した結果、仕上がり密度のばらつきの程度を把握するとともに、要求性能を満足する施工が可能であることを確認できた。このことより、浅地中ピット処分施設における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能であることを確認できた。

第3章 参考文献

- 1) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、二分冊の1、第5編 安定化試験、第2章 突固めによる土の締固め試験、p.382, 2009.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、二分冊の1、第5編 安定化試験、第2章 突固めによる土の締固め試験、pp.373-382, 2009.
- 3) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説、第1章 概説、p.559, 2004.
- 4) 公益社団法人地盤工学会 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会：低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書、2016.12.
- 5) 千々松正和、木村誠、庭瀬一仁、工藤淳、矢込吉則、河原忠弘：低配合ベントナイト混合土の現場施工性試験における透水試験結果と配合設定に関する検討、第67回年次学術講演会講演概要集、CS13-009, pp.17-18, 2012.9.
- 6) 千々松正和、木村誠、庭瀬一仁、工藤淳、矢込吉則、河原忠弘：低配合ベントナイト混合土の現場施工性試験における透水試験結果と配合設定に関する検討、第67回年次学術講演会講演概要集、CS13-009, pp.17-18, 2012.9.
- 7) 山田淳夫、千々松正和、藤原齊郁、矢田勤、秋山吉弘、小峯秀雄、飯塚敦：放射性廃棄物の地下空洞処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施行品質の評価、土木学会論文集 C (地圏工学)、Vol.71, No.3, pp.147-162, 2015.
- 8) 山田淳夫、千々松正和、秋山吉弘、小峯秀雄、飯塚敦：放射性廃棄物の地下空洞処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施行品質の評価、土木学会論文集 C (地圏工学)、Vol.72, No.2, pp.162-178, 2016.
- 9) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説、第9編 現場密度試験、第5章 コアカッターに

よる土の密度試験, pp.801-807, 2012.

¹⁰⁾ Atsuo Yamada, Masakazu Chijimatsu, and Hideo Komine : Method for Measuring Dry Density of Compacted Bentonite Mixture Soil Using 3D Laser Scanner date, WM2019 Conference, March 3 - 7, 2019, Phoenix, Arizona, USA, No. 19119, 2109.3.

¹¹⁾ 小栗光, 山田淳夫, 千々松正和, 塚尾伸, 工藤淳, 矢込吉則 : 難透水性覆土材の環境条件による品質変動確認試験, 第73回年次学術講演会講演概要集, CS7-038, pp.75-76, 2018.8.

第4章

施工データより性能確認を 行うための代替指標の提案

4.1 本章の目的

2章で示した中深度処分における低透水層は、加水調整したベントナイトのみを使用する。施工管理では、締固め後の乾燥密度の管理をすれば透水係数の目標値を担保できることを確認した。ベントナイトの乾燥密度と透水係数との間の相関関係はKomine¹⁾の研究により理論的にも明らかとなっている。本章では小峯らの研究を参照しその適用性について確認する。

3章では浅地中ピット処分における低透水層に用いる材料の配合の選定を室内配合試験の結果より、目標とする透水係数を満足するための施工段階における目標値として締固め規定値を設定し、この締固め規定値を満足する施工ができるということを示した。また、回収した試料の乾燥密度が目標の締固め規定値を満足しているものである限り、この試料を用いた透水試験の結果より透水係数も要求を満足する水準となることを示した。しかしながら、図 4.1-1, 図 4.1-2 に示すように締固め規定値=乾燥密度と透水係数との間の因果関係は経験的に取得したものであり、理論的根拠がないのが現状である。また、実際に透水試験の結果を確認するまで施工した土構造物の透水性能は評価できない。

本章では、浅地中ピット処分における低透水層に用いるベントナイト混合土を対象とした、施工段階における品質確認試験のデータを用いて素早く透水係数を評価するための代替指標について提案を行う。

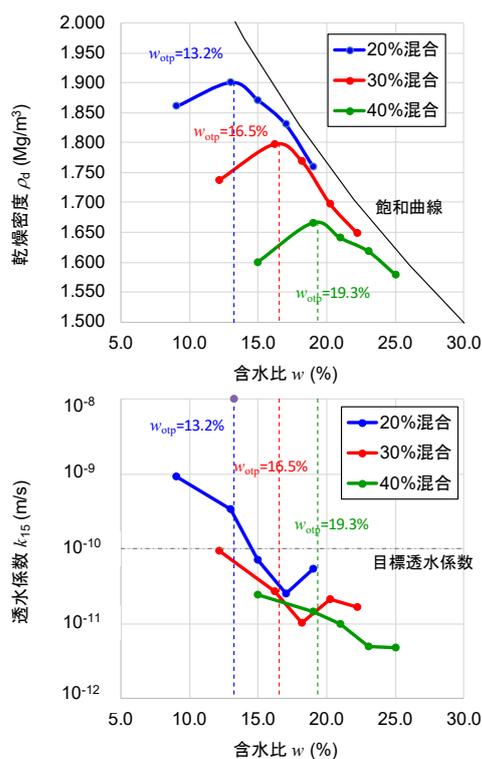


図 4.1-1 締固め曲線と透水係数 (図 3.2-11 の再掲)

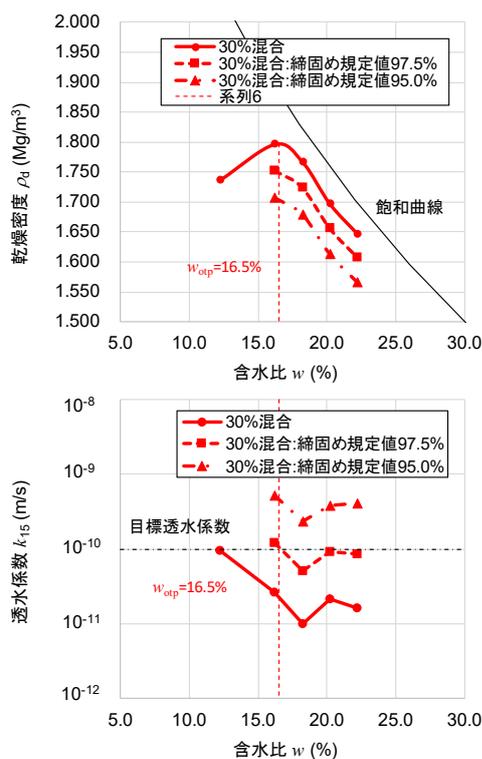


図 4.1-2 締固め曲線と透水係数 (Be30%, 図 3.2-9 の再掲)

4.2 ベントナイトのみの場合の代替指標

4.2.1 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式の概要

Komine¹⁾は「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* 」と透水係数はほぼ良好な相関関係にあることより、数式 4.2-1～数式 4.2-7 に示す「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式」を提案している。「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* 」は数式 4.2-4～数式 4.2-6 により算出されるものであり、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの膨潤変形前後の体積比率を意味し、モンモリロナイトの結晶レベルでの膨潤挙動と緩衝材・埋戻し材の膨潤挙動を結ぶパラメータである。数式 4.2-3 は、モンモリロナイトの結晶レベルの膨潤挙動を考え、モンモリロナイトの膨潤体積ひずみと平行配列した 2 枚のモンモリロナイト結晶層間の距離を関係づける式である。Komine は、緩衝材や埋戻し材の透水係数が主にモンモリロナイトの結晶層間を流れる水の速度に支配されるものと考え、モンモリロナイト結晶層間の水の流れを二次元的な平行平板間を流れる定常で非圧縮性流体の層流と仮定した条件下で Navier-Stokes の方程式を解くことにより数式 4.2-2 を導いている。数式 4.2-1 は、ベントナイトの主要な交換性陽イオンの影響を考慮して緩衝材・埋戻し材の透水係数を求めるための式としており、数式 4.2-2 から計算される k_i の値を各イオンの交換容量を用いて加重平均することにより導いている。Komine の提案式の数式 4.2-3～数式 4.2-7 に用いられているパラメータのうち締め固めた低透水層の乾燥密度 ρ_{d0} 以外は配合設定・材料選定の段階で決定される固定値であり、数式 4.2-2 および数式 4.2-7 で用いている水の単位体積重量や水の粘性係数は透水試験時の水の温度に関連づけている。数式 4.2-2 においてモンモリロナイト結晶層間中の水の密度 γ_{aw} と粘性係数 μ_{aw} が必要になるが、Komine は数式 4.2-7 により、結晶層間水と自由水との各物理量の比 R をパラメータとして、自由水の密度 γ_{fw} と粘性係数 μ_{fw} から算出する方法を提案している。すなわち、Komine の提案式は施工管理上重要なパラメータである締め固め後の乾燥密度 ρ_{d0} を用いて透水係数を理論的に表す式であることに他ならない。そのため、本論文では 2 章で示したベントナイト単体を締め固めた低透水層の透水係数に替わる代替指標は乾燥密度を用いることは合理的であると考えらる。

$$k = \frac{1}{CEC} \sum_{i=Na^+,Ca^{2+},K^+,Mg^{2+}} [EXC_i k_i] \tag{数式 4.2-1}$$

$$k_i = \frac{\gamma_{aw}}{12\mu_{aw}} (2d_i)^2 \tag{数式 4.2-2}$$

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \{t + (R_{ion})_i\} + (R_{ion})_i \tag{数式 4.2-3}$$

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_0 + 1) \right\} \times \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad \text{数式 4.2-4}$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad \text{数式 4.2-5}$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad \text{数式 4.2-6}$$

$$\frac{\gamma_{aw}}{\mu_{aw}} = R \frac{\gamma_{fw}}{\mu_{fw}} \quad \text{数式 4.2-7}$$

ここに、 k ：緩衝材・埋戻し材の透水係数 (m/sec)， EXC_i ：交換性陽イオン i の交換容量 (meq./g) (i は Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} のいずれかの交換性陽イオンを示す。以下に記述される i はこれと同様の意味である。)、 CEC ：陽イオン交換容量 (meq./g)， d_i ：交換性陽イオン i のときのモンモリロナイト結晶層間距離の 1/2 (m)， γ_{aw} ：モンモリロナイト結晶層間中の水の密度 (Pa/m)， μ_{aw} ：モンモリロナイト結晶層間中の水の粘性係数 (Pa·sec)， $(R_{ion})_i$ ：モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン i の非水和イオン半径 (m)， t ：モンモリロナイトの結晶層厚 (m)， ε_{sv}^* ：モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ (%)， ε_{smax} ：緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率 (%)， e_0 ：緩衝材・埋戻し材の間隙比， C_m ：ベントナイトのモンモリロナイト含有率(%)， ρ_{d0} ：緩衝材・埋戻し材の乾燥密度 (Mg/m³)， α ：ベントナイト配合率 (%) (本章では $\alpha=100\%$)， ρ_m ：モンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³)， ρ_{nm} ：モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度(Mg/m³)， ρ_{sand} ：砂の土粒子密度(Mg/m³)， γ_{fw} ：自由水の密度(Pa/m)， μ_{fw} ：自由水の粘性係数(Pa·sec)， R ：結晶層間水と自由水との各物理量の比

4.2.2 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式による評価結果

表 4.2-1 にベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式による計算において用いたパラメータの値を示す¹⁾。水の密度 $\gamma_{fw}=9783.4$ Pa/m，水の粘性係数 $\mu_{fw}=0.000963$ Pa·sec は，実験室内温度 $T=295.15$ K に対応する値を参考文献²⁾を参考に設定した。 R は参考文献³⁾を参考に，粘土に対する値の $R=79$ を設定し計算した。図 4.2-1 は，図 2.5-1 に示した乾燥密度と透水係数の関係のグラフに理論評価式による計算結果を追加したものである。この図より，比較的良好な精度をもって，Komine の提案する理論評価式は各種ベントナイトの透水係数を予測・評価できると考えられる。

表 4.2-1 使用した各パラメータの値

ベントナイト	クニゲル GX (粉碎前のクニゲル V1 の粒状体)
$\rho_m : \text{Mg/m}^3$	2.77
$\rho_{nm} : \text{Mg/m}^3$	2.81
$C_m : \%$	48
$CEC : \text{meq./g}$	0.732
$EXC_{Na^+} : \text{meq./g}$	0.405
$EXC_{Ca^{2+}} : \text{meq./g}$	0.287
$EXC_{K^+} : \text{meq./g}$	0.009
$EXC_{Mg^{2+}} : \text{meq./g}$	0.030
$(R_{ion})_{Na} : \text{nm}$	0.098
$(R_{ion})_{Ca} : \text{nm}$	0.1115
$(R_{ion})_{K} : \text{nm}$	0.133
$(R_{ion})_{Mg} : \text{nm}$	0.0835
$t : \text{m}$	9.60×10^{-10}
$\gamma_{fw} : \text{Pa/m}$	9783.4
$\mu_{fw} : \text{Pa}\cdot\text{sec}$	0.000959
R	79

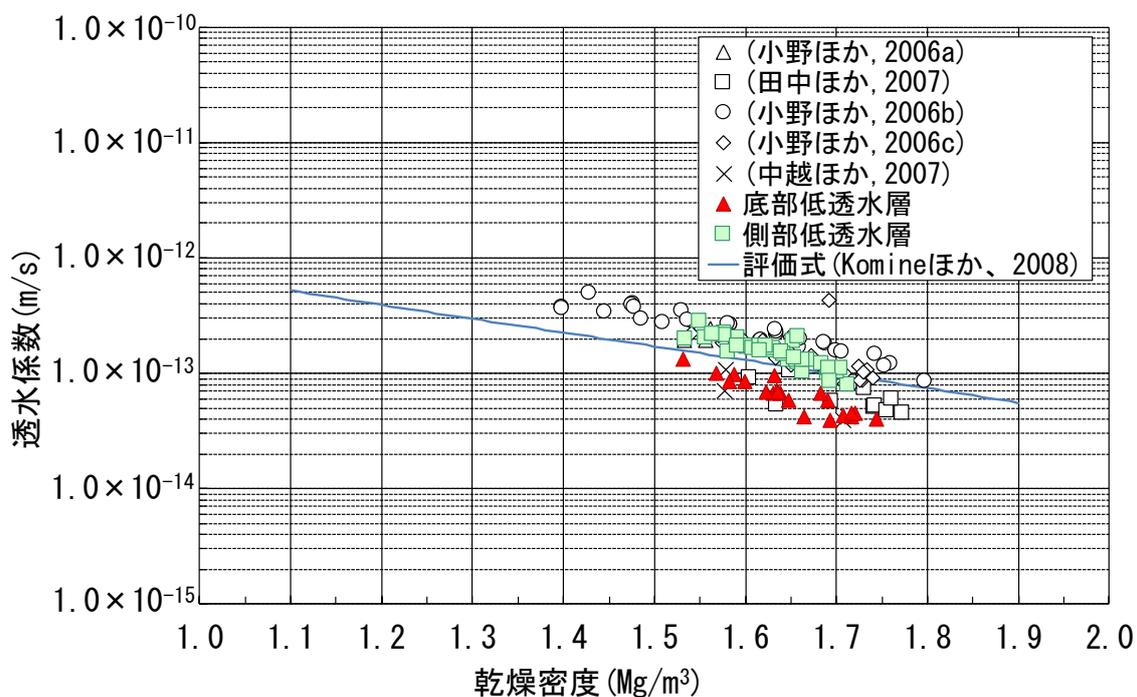


図 4.2-1 乾燥密度と透水係数の関係

4.2.3 ベントナイトのみの場合の代替指標を求めるための算出方法

図 4.2-2 に Komine が提案した透水係数理論評価式による透水係数の計算フローを示す。 ε_{sv}^* の計算から始まり、その都度用いるパラメータと数式を使用順に示している。このフローに従えば図 4.2-1 に示したような透水係数の計算が可能となる。

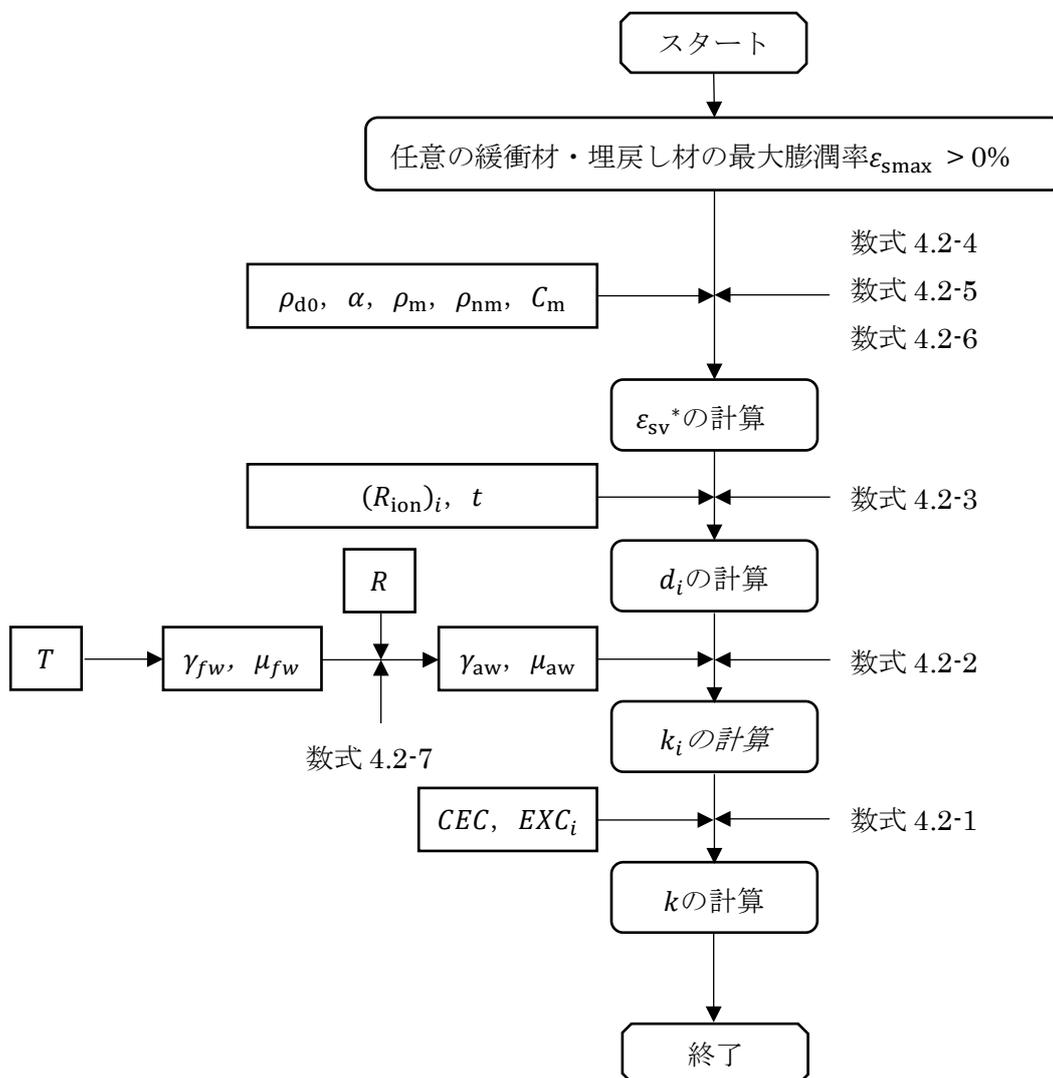


図 4.2-2 透水係数理論評価式による透水係数の計算フロー

4.3 ベントナイト混合土中の状態

「3.1 配合設定の考え方と施工時の目標の設定」で示したデータ⁴⁾を用いて、締め固めたベントナイト混合土中のベントナイト、砂、水、間隙の空気との構成比を模式的に表したものが図 4.3-1～図 4.3-3 である。ここでは、例としてベントナイト混合率 30%、締め固め規定値 $C=100\%$ 、 97.5% 、 95.0% のものを示す。ベントナイトと砂の合計質量と全体の体積の関係より求められる乾燥密度は、最適含水比で最大となり、それよりも湿潤側でベントナイトと砂の体積の構成比率は低くなっているのがわかる。また、湿潤側は水の構成比が高くなり最適含水比の時よりも間隙の空気が少なくなることがわかる。

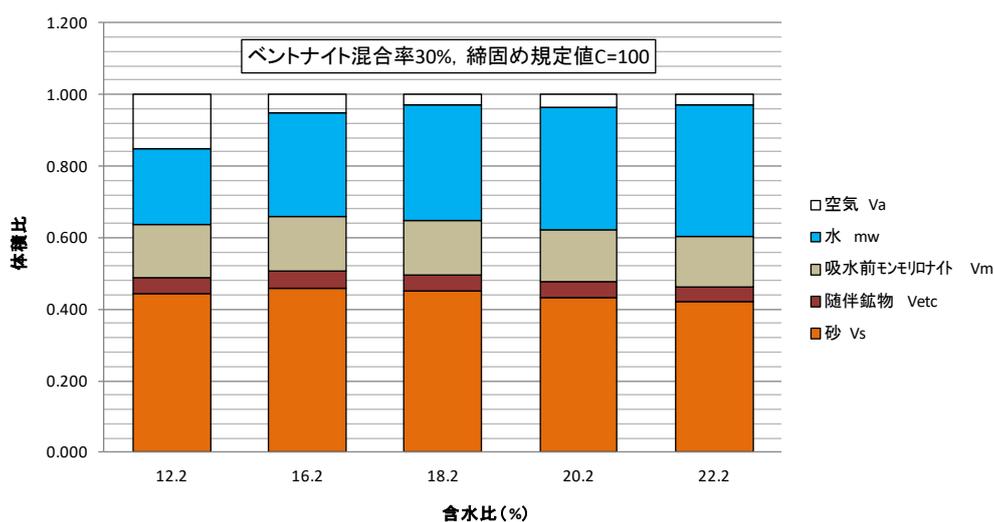


図 4.3-1 ベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, 締め固め規定値 $C=100\%$)

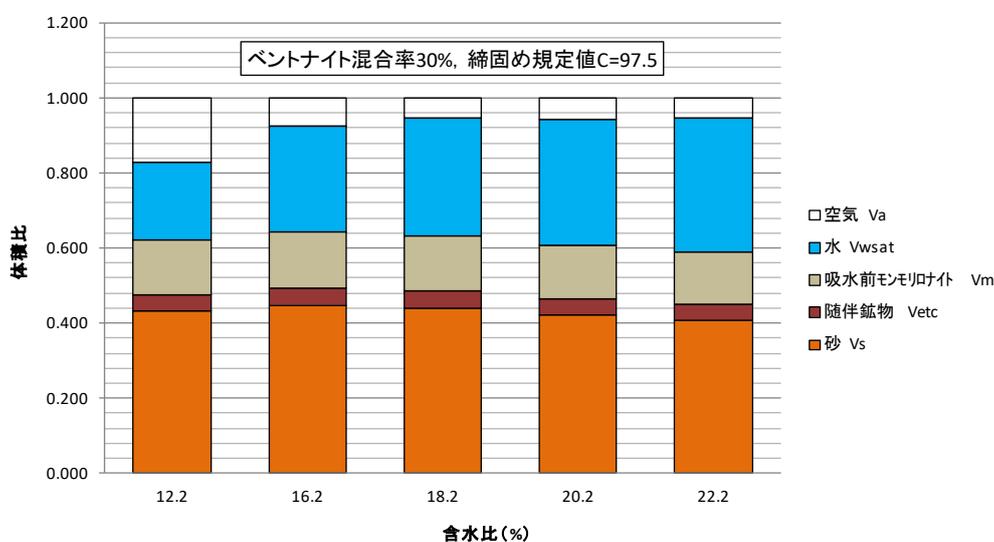


図 4.3-2 ベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, 締め固め規定値 $C=97.5\%$)

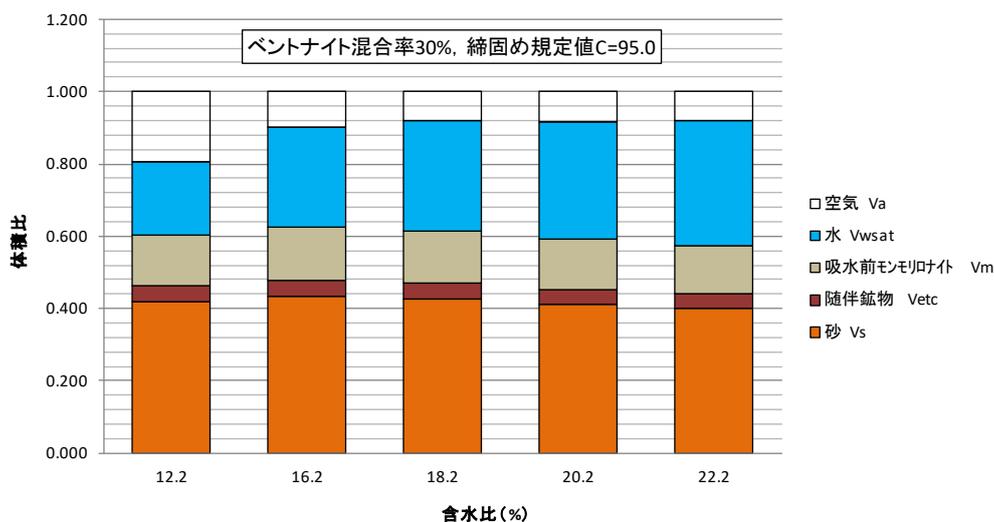


図 4.3-3 ベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, 締固め規定値 C=95.0%)

4.4 ベントナイト混合土中の通水経路を考慮した有効モンモリロナイト間隙比の定義

土中の通水箇所を考慮すると、間隙部がその通水箇所であることが容易に想像できる。そのため、透水性に有効な間隙について考える。先の締め固めたベントナイト中の構成比のうち、水と空気の部分に水が流れることを考慮すると、間隙比での整理が有効である。

ベントナイトは吸水によって膨潤する粘土である。図 4.3-1～図 4.3-3 で示した構成比のうち、水の一部がベントナイトに取り込まれ、水の体積がその分ベントナイトの体積に取り込まれたことを想定する。すなわち、ベントナイトの粘土鉱物であるモンモリロナイトの層間に水が取り込まれる、または砂やモンモリロナイトの表面に吸着し、その分だけ水の体積が減ることを考慮する。この時、水の密度は 1.0 Mg/m^3 として仮定する。間隙水はその存在位置によって、自由水、土粒子表面に吸着している吸着水、ベントナイト中に取り込まれた層間水の三つに分類した。それぞれの水の状態を表す模式図を図 4.4-1 に示す。

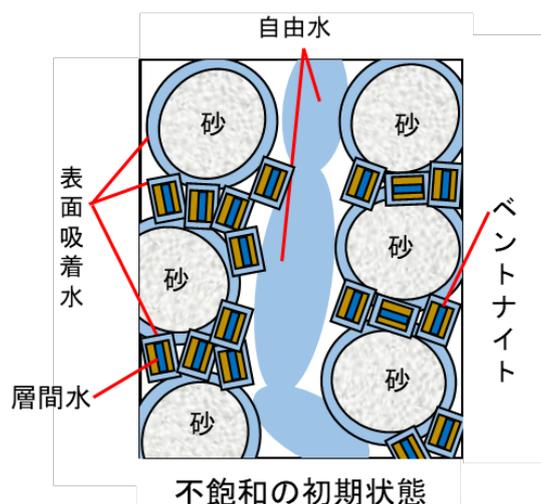


図 4.4-1 ベントナイト混合土中の水の状態の模式図

まず層間水の量を計算する。既往の研究⁵⁾によると、Ca型ベントナイトの結晶底面間隔をX線回折から求めた結果、ベントナイト中のモンモリロナイトの層間は膨潤前9.6Åであったが底面間隔が19.6Åになるまで膨潤し、数層以上の結晶層が分離されずに維持されることを示している。これにより、モンモリロナイトの結晶層間の容積は数式4.4-1のように増加する。

$$V = \frac{l_2 - l_1}{\rho_m l_1} \quad \text{数式 4.4-1}$$

ここで、Vは単位質量あたりの層間容積の増加量 (cm³/g)、 l_1 と l_2 は膨潤前後の結晶底面間隔 ($l_1 = 9.6\text{\AA}$, $l_2 = 19.6\text{\AA}$)、 ρ_m はモンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³) で、2.77 Mg/m³である⁶⁾。これらの値より、層間容積の増加量Vは0.376 cm³/gであり、モンモリロナイト1gにつき約0.38 cm³増加することがわかる。

次に表面吸着水の量を計算する。モンモリロナイトのような粘土鉱物の表面や、骨材である砂の表面は負に帯電することにより、水分子を吸着することが考えられる⁷⁾。このようにして土粒子表面(モンモリロナイトや砂の表面)に吸着した水分子は移動せずに通水に寄与しないと考えられるので、この吸着した水分も見かけ上、混合土中の土粒子間隙を埋めるように作用する。既往の研究⁵⁾によれば、ベントナイトの質量に対する比表面積Sは65 m²/g、砂の質量に対する比表面積は砂の形状を球体と仮定すると数式4.4-2より、0.00186 m²/gとなる。

$$S = \frac{a}{m} = \frac{4\pi R^2}{\rho(4\pi R^3/3)} = \frac{3}{\rho R} \quad \text{数式 4.4-2}$$

ここで、 ρ : 砂の土粒子密度 (2.65 Mg/m^3 とした), R : 砂粒子の半径 ($D_{50}=0.61 \times 10^{-3} \text{ m}$ とした)

ベントナイトの質量に対する比表面積および砂の質量に対する比表面積に, それぞれベントナイトの質量と砂の質量をかけて土粒子表面への吸着水を求めた. この時, 水は土粒子表面へ水分子1層分の厚さ 2.8\AA ⁸⁾がまず吸着すると仮定した.

ところが, 粘土粒子表面のごく近傍では, 図 4.4-2⁹⁾に示すように水和した陽イオンが粒子表面に吸着・固定されるような状態になると考えられている⁷⁾. このように水和した陽イオンが吸着・固定される部分は Stern 層と呼ばれており, この Stern 層の厚さ, すなわち水和した陽イオンの半径分の厚さの分だけ土粒子表面に水が吸着していると考えられる. 本研究で用いたベントナイトと同じ種類のベントナイトを用いて各種の交換性陽イオンの交換容量を調査した結果¹⁾によると, 表 4.4-1 のようになる. 各イオンの水和イオン半径は表 4.4-2⁷⁾に示したようになるので, 各イオンの存在比率より見かけ上の水和イオン半径は 9.2\AA となる.

結局, 砂の表面には水分子1層分の 2.8\AA の厚さ, ベントナイト表面には $2.8+9.2=12.0\text{\AA}$ の厚さ分だけ吸着されると考えた.

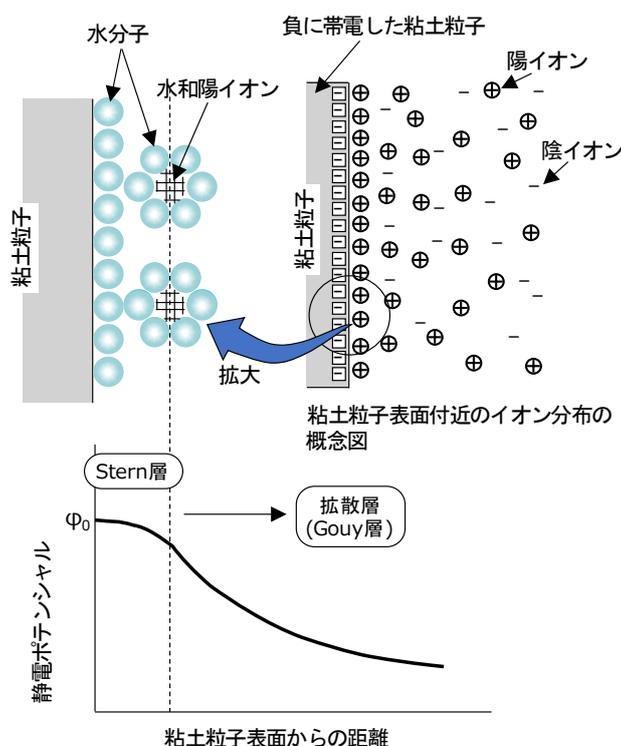


図 4.4-2 粘土粒子表面の水の吸着の概念図⁹⁾

表 4.4-1 Ca 型ベントナイト (クニボンド) の交換性陽イオン容量¹⁾

CEC (meq/g)	EXC_{Na}^+ (meq/g)	EXC_{Ca}^{2+} (meq/g)	EXC_K^+ (meq/g)	EXC_{Mg}^{2+} (meq/g)
0.796	0.119	0.585	0.019	0.072
比率 (%)	15.0	73.6	2.4	9.0

ここに、CEC: 陽イオン交換容量, EXC_{Na}^+ : 交換性陽イオン Na の交換容量, EXC_{Ca}^{2+} : 交換性陽イオン Ca の交換容量, EXC_K^+ : 交換性陽イオン K の交換容量, EXC_{Mg}^{2+} : 交換性陽イオン Mg の交換容量

表 4.4-2 各陽イオンの水和イオン半径⁷⁾

Na (Å)	Ca (Å)	K (Å)	Mg (Å)	各イオンの比率から求めた平均の水和イオン半径 ($7.9 \times 15\% + 9.6 \times 73.6\% + 5.3 \times 2.4\% + 9.0 \times 9.0\%$, Å)
5.6 - 7.9	9.6	3.8 - 5.3	10.8	9.2

単位質量あたりの層間容積の増加量に単位容積中のモンモリロナイトの質量, 砂とモンモリロナイトそれぞれの比表面積に単位容積中のモンモリロナイト・砂の質量をそれぞれ掛けて結晶層間に取り込まれた水分量と土粒子表面に吸着した水分量を計算した結果を図 4.4-3~図 4.4-5 および表 4.4-3~表 4.4-10 に示す. また, 表中に用いられている記号と混合土中の構成との関係を示した概念図を図 4.4-6 に示す.

結果として, 土粒子表面への吸着水の量は少なく, 間隙の量の変化に対する影響は非常に小さい. モンモリロナイトの結晶層間に取り込まれた水の量は多く, 間隙の量の変化に与える影響は大きい.

水が結晶層間に取り込まれたり, 土粒子表面に吸着した分を考慮しても混合土中の間隙は全体積のうち 20~30%程度残ると考えられる. この混合土中の間隙は乾燥密度が大きいほど間隙が少なくなっている. 水はこの間隙を流れるため, 間隙が少ない方が透水係数も小さくなることが予測される.

第4章 施工データより性能確認を行うための代替指標の提案

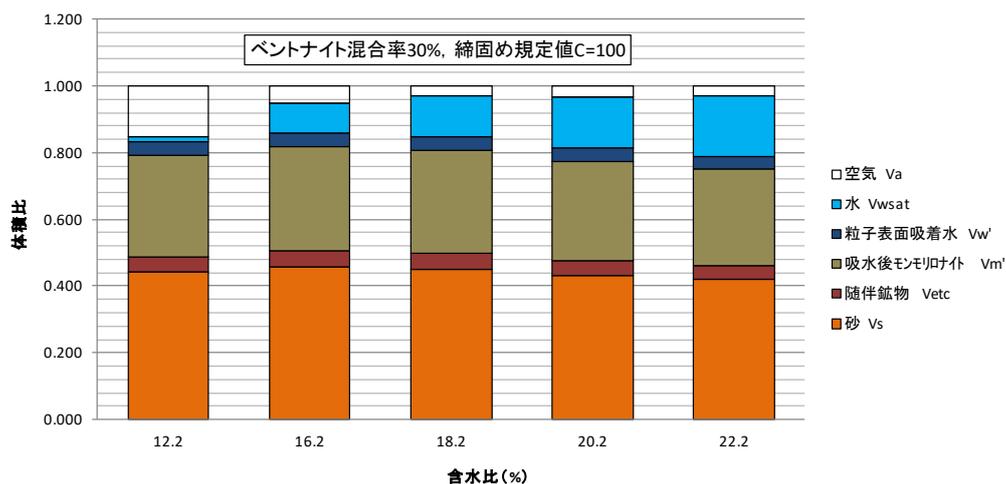


図 4.4-3 吸水後のベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, C=100%)

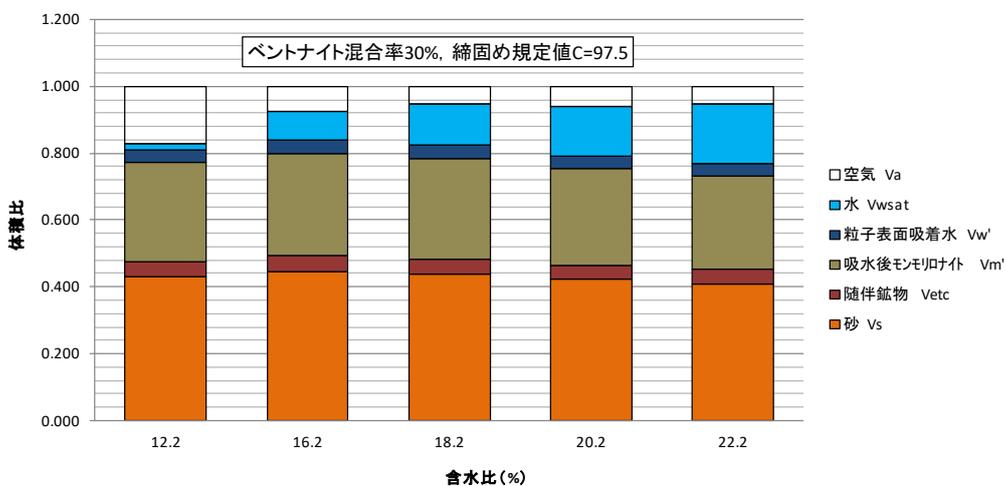


図 4.4-4 吸水後のベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, C=97.5%)

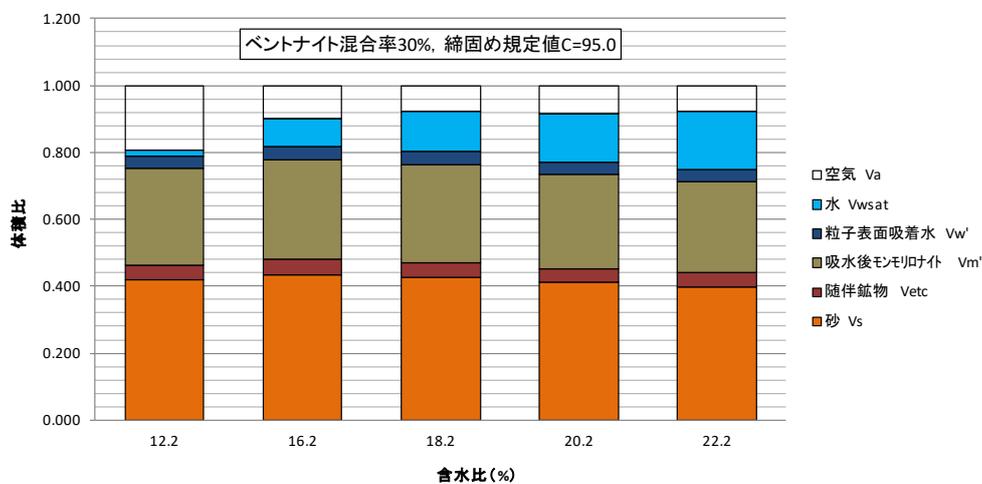


図 4.4-5 吸水後のベントナイト混合土の構成図 (混合率 30%, C=95.0%)

表 4.4-3 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 20%, C=100%）

ベントナイト混合率20%, C=100%	1	2	3	4	5
含水比 w	9.0	13.0	15.0	17.0	19.0
乾燥密度 ρ_d	1.860	1.900	1.870	1.830	1.760
湿潤密度 ρ_{sat}	2.027	2.147	2.151	2.141	2.094
透水係数 k_{15}	9.34×10^{-10}	3.39×10^{-10}	7.17×10^{-10}	2.55×10^{-10}	5.46×10^{-10}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.372	0.380	0.374	0.366	0.352
モンモリロナイト m_m	0.294	0.300	0.295	0.289	0.278
随伴鉱物 m_{etc}	0.078	0.080	0.079	0.077	0.074
砂 m_s	1.488	1.520	1.496	1.464	1.408
水 m_w	0.167	0.247	0.281	0.311	0.334
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.138	0.141	0.139	0.136	0.131
吸水前モンモリロナイト V_m	0.106	0.108	0.107	0.104	0.100
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.216	0.221	0.217	0.213	0.205
随伴鉱物 V_{etc}	0.033	0.033	0.033	0.032	0.031
砂 V_s	0.541	0.553	0.544	0.533	0.512
粒子表面吸着水 V_w'	0.029	0.030	0.029	0.029	0.027
水 V_{wsat}	0.028	0.105	0.140	0.174	0.203
空気 V_a	0.153	0.058	0.036	0.020	0.022
間隙比 e					
間隙比 e	0.47	0.44	0.46	0.50	0.55
間隙率 n					
間隙率 n	18.1	16.3	17.6	19.4	22.5
⑥有効モンモリロナイト間隙比 e_m					
⑥有効モンモリロナイト間隙比 e_m	1.70	1.51	1.65	1.86	2.24
⑥'吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'					
⑥'吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.84	0.74	0.81	0.91	1.10
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}					
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	1.024	1.105	1.044	0.969	0.855
初期状態の飽和度 S_r					
初期状態の飽和度 S_r	52.3	80.9	88.7	94.0	93.8
吸水後の飽和度 S_r'					
吸水後の飽和度 S_r'	15.5	64.2	79.6	89.7	90.1

表 4.4-4 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 20%, C=97.5%）

ベントナイト混合率20%, C=97.5%	1	2	3	4	5
含水比 w	9.0	13.0	15.0	17.0	19.0
乾燥密度 ρ_d	1.814	1.853	1.823	1.784	1.716
湿潤密度 ρ_{sat}	1.977	2.093	2.097	2.088	2.042
透水係数 k_{15}	N.D.	1.45×10^{-9}	4.56×10^{-10}	1.80×10^{-10}	2.75×10^{-10}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.363	0.371	0.365	0.357	0.343
モンモリロナイト m_m	0.286	0.292	0.288	0.282	0.271
随伴鉱物 m_{etc}	0.077	0.078	0.077	0.075	0.072
砂 m_s	1.451	1.482	1.459	1.427	1.373
水 m_w	0.163	0.241	0.273	0.303	0.326
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.135	0.137	0.135	0.132	0.127
吸水前モンモリロナイト V_m	0.103	0.106	0.104	0.102	0.098
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.211	0.215	0.212	0.208	0.200
随伴鉱物 V_{etc}	0.032	0.032	0.032	0.031	0.030
砂 V_s	0.528	0.539	0.531	0.519	0.500
粒子表面吸着水 V_w'	0.028	0.029	0.028	0.028	0.027
水 V_{wsat}	0.027	0.102	0.137	0.170	0.197
空気 V_a	0.174	0.082	0.060	0.044	0.047
間隙比 e					
間隙比 e	0.51	0.48	0.50	0.53	0.59
間隙率 n					
間隙率 n	20.1	18.4	19.7	21.4	24.4
⑥有効モンモリロナイト間隙比 e_m					
⑥有効モンモリロナイト間隙比 e_m	1.95	1.74	1.90	2.11	2.50
⑥'吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'					
⑥'吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.95	0.85	0.93	1.03	1.22
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}					
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	0.694	0.732	0.704	0.668	0.610
初期状態の飽和度 S_r					
初期状態の飽和度 S_r	48.4	74.6	82.0	87.2	87.5
吸水後の飽和度 S_r'					
吸水後の飽和度 S_r'	13.6	55.4	69.5	79.2	80.9

表 4.4-5 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 20%, C=95.0%）

ベントナイト混合率20%, C=95.0%	1	2	3	4	5
含水比 w	9.0	13.0	15.0	17.0	19.0
乾燥密度 ρ_d	1.767	1.805	1.777	1.739	1.672
湿潤密度 ρ_{sat}	1.926	2.040	2.043	2.034	1.990
透水係数 k_{15}	N.D.	5.61×10^{-9}	2.58×10^{-9}	1.14×10^{-9}	1.27×10^{-9}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.353	0.361	0.355	0.348	0.334
モンモリロナイト m_m	0.279	0.285	0.280	0.274	0.264
随伴鉱物 m_{etc}	0.075	0.076	0.075	0.073	0.071
砂 m_s	1.414	1.444	1.421	1.391	1.338
水 m_w	0.159	0.235	0.266	0.296	0.318
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.131	0.134	0.132	0.129	0.124
吸水前モンモリロナイト V_m	0.101	0.103	0.101	0.099	0.095
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.206	0.210	0.207	0.202	0.194
随伴鉱物 V_{etc}	0.031	0.032	0.031	0.030	0.029
砂 V_s	0.514	0.525	0.517	0.506	0.487
粒子表面吸着水 V_w'	0.028	0.028	0.028	0.027	0.026
水 V_{wsat}	0.027	0.099	0.133	0.165	0.192
空気 V_a	0.195	0.106	0.084	0.069	0.071
間隙比 e					
	0.55	0.52	0.54	0.57	0.64
間隙率 n					
	22.2	20.5	21.7	23.4	26.3
有効モンモリロナイト間隙比 e_m					
	2.20	1.99	2.15	2.36	2.77
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'					
	1.08	0.98	1.05	1.16	1.35
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}					
	0.653	0.687	0.661	0.629	0.576
初期状態の飽和度 S_r					
	44.9	69.0	76.0	81.1	81.7
吸水後の飽和度 S_r'					
	12.0	48.5	61.3	70.6	73.0

表 4.4-6 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 30%, C=100%）

ベントナイト混合率30%, C=100%	1	2	3	4	5
含水比 w	12.2	16.2	18.2	20.2	22.2
乾燥密度 ρ_d	1.737	1.797	1.768	1.698	1.648
湿潤密度 ρ_{sat}	1.949	2.088	2.090	2.041	2.014
透水係数 k_{15}	9.39×10^{-11}	2.65×10^{-11}	1.01×10^{-11}	2.14×10^{-11}	1.64×10^{-11}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.521	0.539	0.530	0.509	0.494
モンモリロナイト m_m	0.411	0.425	0.418	0.402	0.390
随伴鉱物 m_{etc}	0.110	0.114	0.112	0.107	0.104
砂 m_s	1.216	1.258	1.238	1.189	1.154
水 m_w	0.212	0.291	0.322	0.343	0.366
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.193	0.200	0.197	0.189	0.183
吸水前モンモリロナイト V_m	0.148	0.154	0.151	0.145	0.141
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.303	0.314	0.308	0.296	0.288
随伴鉱物 V_{etc}	0.046	0.047	0.046	0.045	0.043
砂 V_s	0.442	0.458	0.450	0.433	0.420
粒子表面吸着水 V_w'	0.041	0.042	0.041	0.040	0.039
水 V_{wsat}	0.017	0.089	0.123	0.152	0.181
空気 V_a	0.152	0.050	0.030	0.035	0.030
間隙比 e					
	0.57	0.52	0.54	0.61	0.66
間隙率 n					
	16.8	14.0	15.3	18.7	21.1
有効モンモリロナイト間隙比 e_m					
	1.13	0.91	1.02	1.29	1.50
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'					
	0.56	0.45	0.50	0.63	0.73
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}					
	1.298	1.451	1.374	1.210	1.109
初期状態の飽和度 S_r					
	58.3	85.2	91.4	90.8	92.3
吸水後の飽和度 S_r'					
	9.9	63.8	80.2	81.4	85.6

表 4.4-7 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 30%, C=97.5%）

ベントナイト混合率30%, C=97.5%	1	2	3	4	5
含水比 w	12.2	16.2	18.2	20.2	22.2
乾燥密度 ρ_d	1.694	1.752	1.724	1.656	1.607
湿潤密度 ρ_{sat}	1.900	2.036	2.038	1.990	1.964
透水係数 k_{15}	N.D.	1.22×10^{-10}	5.08×10^{-11}	9.26×10^{-11}	8.52×10^{-11}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.508	0.526	0.517	0.497	0.482
モンモリロナイト m_m	0.401	0.415	0.408	0.392	0.380
随伴鉱物 m_{etc}	0.107	0.111	0.109	0.105	0.102
砂 m_s	1.186	1.226	1.207	1.159	1.125
水 m_w	0.207	0.284	0.314	0.334	0.357
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.189	0.195	0.192	0.184	0.179
吸水前モンモリロナイト V_m	0.145	0.150	0.147	0.141	0.137
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.295	0.306	0.301	0.289	0.280
随伴鉱物 V_{etc}	0.044	0.046	0.045	0.043	0.042
砂 V_s	0.431	0.446	0.439	0.422	0.409
粒子表面吸着水 V_w'	0.040	0.041	0.040	0.039	0.038
水 V_{wsat}	0.016	0.087	0.120	0.148	0.176
空気 V_a	0.173	0.074	0.055	0.059	0.055
間隙比 e					
間隙率 n	0.61	0.56	0.58	0.65	0.70
有効モンモリロナイト間隙比 e_m	18.9	16.1	17.5	20.7	23.1
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	1.31	1.08	1.19	1.47	1.68
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.64	0.53	0.58	0.72	0.82
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	1.201	1.334	1.267	1.124	1.034
初期状態の飽和度 S_r	54.4	79.3	85.2	85.0	86.7
吸水後の飽和度 S_r'	8.6	53.9	68.7	71.5	76.3

表 4.4-8 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 30%, C=95.0%）

ベントナイト混合率30%, C=95.0%	1	2	3	4	5
含水比 w	12.2	16.2	18.2	20.2	22.2
乾燥密度 ρ_d	1.650	1.707	1.680	1.613	1.566
湿潤密度 ρ_{sat}	1.851	1.984	1.985	1.939	1.913
透水係数 k_{15}	N.D.	5.24×10^{-10}	2.38×10^{-10}	3.76×10^{-10}	4.15×10^{-10}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.495	0.512	0.504	0.484	0.470
モンモリロナイト m_m	0.391	0.404	0.398	0.382	0.371
随伴鉱物 m_{etc}	0.104	0.108	0.106	0.102	0.099
砂 m_s	1.155	1.195	1.176	1.129	1.096
水 m_w	0.201	0.277	0.306	0.326	0.348
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.184	0.190	0.187	0.180	0.174
吸水前モンモリロナイト V_m	0.141	0.146	0.144	0.138	0.134
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.288	0.298	0.293	0.281	0.273
随伴鉱物 V_{etc}	0.043	0.045	0.044	0.042	0.041
砂 V_s	0.420	0.435	0.428	0.411	0.399
粒子表面吸着水 V_w'	0.039	0.040	0.039	0.038	0.037
水 V_{wsat}	0.016	0.085	0.117	0.145	0.172
空気 V_a	0.194	0.098	0.079	0.083	0.079
間隙比 e					
間隙率 n	0.65	0.60	0.63	0.69	0.74
有効モンモリロナイト間隙比 e_m	21.0	18.3	19.6	22.8	25.0
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	1.49	1.25	1.36	1.65	1.87
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.73	0.61	0.67	0.81	0.92
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	1.113	1.230	1.172	1.045	0.965
初期状態の飽和度 S_r	50.9	73.8	79.5	79.7	81.5
吸水後の飽和度 S_r'	7.5	46.4	59.7	63.5	68.5

表 4.4-9 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 40%, C=100%）

ベントナイト混合率40%, C=100%	1	2	3	4	5
含水比 w	15.0	19.0	21.0	23.0	25.0
乾燥密度 ρ_d	1.600	1.666	1.640	1.618	1.578
湿潤密度 ρ_{sat}	1.840	1.983	1.984	1.990	1.973
透水係数 k_{15}	2.40×10^{-11}	1.44×10^{-11}	1.00×10^{-11}	4.90×10^{-12}	4.70×10^{-12}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.640	0.666	0.656	0.647	0.631
モンモリロナイト m_m	0.505	0.526	0.518	0.511	0.498
随伴鉱物 m_{etc}	0.135	0.141	0.138	0.137	0.133
砂 m_s	0.960	1.000	0.984	0.971	0.947
水 m_w	0.240	0.317	0.344	0.372	0.395
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.237	0.247	0.243	0.240	0.234
吸水前モンモリロナイト V_m	0.182	0.190	0.187	0.184	0.180
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.372	0.388	0.381	0.376	0.367
随伴鉱物 V_{etc}	0.056	0.058	0.057	0.057	0.055
砂 V_s	0.349	0.364	0.358	0.353	0.345
粒子表面吸着水 V_w'	0.050	0.052	0.051	0.050	0.049
水 V_{wsat}	0.000	0.067	0.099	0.130	0.158
空気 V_a	0.172	0.072	0.053	0.034	0.026
間隙比 e					
間隙率 n	0.70	0.64	0.66	0.68	0.73
有効モンモリロナイト間隙比 e_m	17.3	13.8	15.2	16.3	18.4
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.95	0.73	0.81	0.89	1.02
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.46	0.36	0.40	0.43	0.50
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	1.423	1.602	1.528	1.469	1.369
初期状態の飽和度 Sr	58.2	81.5	86.6	91.7	93.8
吸水後の飽和度 Sr'	0.1	48.3	64.9	79.4	85.9

表 4.4-10 ベントナイト混合土中の構成比と透水係数（混合率 40%, C=95.0%）

ベントナイト混合率40%, C=95.0%	1	2	3	4	5
含水比 w	15.0	19.0	21.0	23.0	25.0
乾燥密度 ρ_d	1.520	1.583	1.558	1.537	1.499
湿潤密度 ρ_{sat}	1.748	1.883	1.885	1.891	1.874
透水係数 k_{15}	N.D.	9.96×10^{-11}	1.60×10^{-10}	1.68×10^{-10}	1.10×10^{-10}
単位体積中の質量					
ベントナイト m_b	0.608	0.633	0.623	0.615	0.600
モンモリロナイト m_m	0.480	0.500	0.492	0.485	0.473
随伴鉱物 m_{etc}	0.128	0.134	0.131	0.130	0.127
砂 m_s	0.912	0.950	0.935	0.922	0.899
水 m_w	0.228	0.301	0.327	0.354	0.375
単位体積中の体積比					
ベントナイト V_b	0.226	0.235	0.231	0.228	0.223
吸水前モンモリロナイト V_m	0.173	0.180	0.178	0.175	0.171
吸水後モンモリロナイト V_m'	0.354	0.368	0.362	0.358	0.349
随伴鉱物 V_{etc}	0.053	0.055	0.054	0.054	0.052
砂 V_s	0.332	0.346	0.340	0.336	0.327
粒子表面吸着水 V_w'	0.047	0.049	0.049	0.048	0.047
水 V_{wsat}	0.000	0.063	0.094	0.123	0.150
空気 V_a	0.214	0.118	0.101	0.082	0.075
間隙比 e					
間隙率 n	0.79	0.72	0.75	0.77	0.82
有効モンモリロナイト間隙比 e_m	21.4	18.2	19.4	20.5	22.5
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	1.24	1.01	1.09	1.17	1.32
吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_m'	0.61	0.49	0.54	0.57	0.64
有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ_{cm}	1.239	1.380	1.322	1.276	1.196
初期状態の飽和度 Sr	51.6	71.8	76.5	81.2	83.4
吸水後の飽和度 Sr'	0.1	35.0	48.2	60.0	66.8

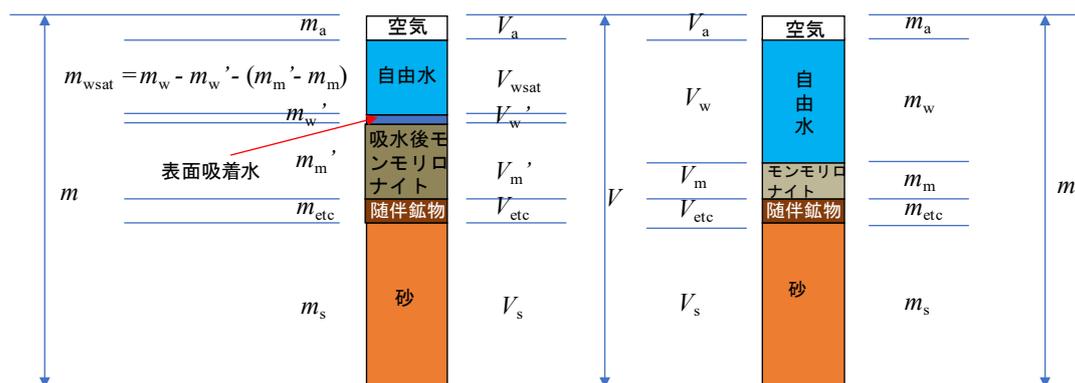


図 4.4-6 混合土中の構成比の概念図

ベントナイト混合土の締固め時の乾燥密度が大きいほど間隙が小さいことを示したが、図 4.1-1、図 4.1-2 に示したように最大乾燥密度の時よりも若干湿潤側で透水係数が最小となる。これは、モンモリロナイトの膨潤や土粒子表面への水の吸着により見かけ上の間隙が減少する現象以外にも、通水に寄与する間隙を少なくする現象が起きていることを示唆する。

モンモリロナイトの膨潤や土粒子表面への水の吸着以外の現象を把握するため、単位容積あたりの吸水後のモンモリロナイトの体積と単位容積あたりの間隙部分の体積の比を「吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} 」と定義する。吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} は、図 4.4-6 の記号を用いると数式 4.4-3 のように表すことができる。この吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数 k_{15} の関係を図 4.4-7 に示す。

$$e_{msat} = \frac{V_a + V_{wsat}}{V_m'} \tag{数式 4.4-3}$$

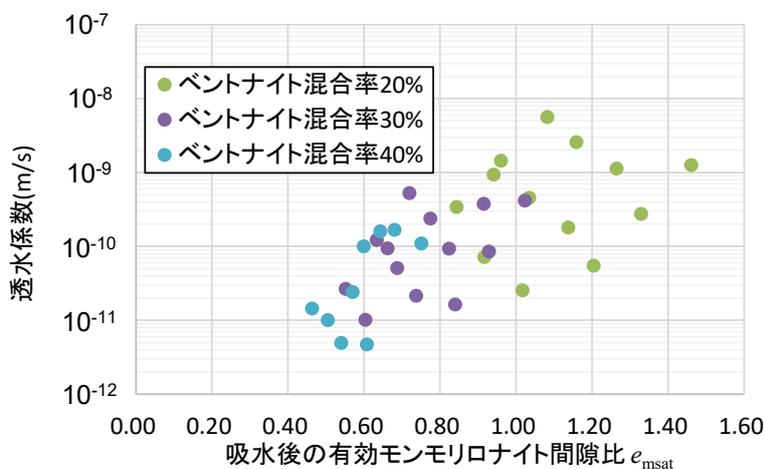


図 4.4-7 吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数の関係

概略的な傾向として吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} の増加に伴い透水係数も大きくなる傾向がみられた。また、ベントナイトの混合率が少なくなると吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} が大きくなるので明確にベントナイトの混合率でグループ分けできる。しかしながら、同じ吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} でも透水係数の分布幅が大きく、1~2桁の範囲に透水係数が分布している。そのため、代替指標として吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} をそのまま適用することは難しい。

ここで、既存の検討^{10), 11), 12)}で示されている代替指標と透水係数との関係と吸水後の有効モンモリロナイト間隙比と透水係数との関係とを比較する。既往の検討で用いられている代替指標として、ベントナイト分、あるいはベントナイト中のモンモリロナイト分の体積と間隙の比率を指標としたものをここでは選定した。有効粘土間隙比 e_b 、有効モンモリロナイト間隙比 e_m 、単位容積あたりの吸水後のモンモリロナイトの体積変化を考慮した「吸水後の有効粘土間隙比 e_{bsat} 」と透水係数との関係をそれぞれ図 4.4-8, 図 4.4-9, 図 4.4-10 に示す。また比較のため吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数との関係を示した図 4.4-7 も図 4.4-11 に再掲する。

さらに、混合土の締固め度が高くなれば間隙も小さくなることより、混合土中のベントナイトやモンモリロナイトの有効密度を指標にしたものについても比較対象とした。ここでは、有効ベントナイト密度（乾燥） ρ_b 、有効ベントナイト湿潤密度 ρ_{bt} 、有効モンモリロナイト密度（乾燥） ρ_{em} 、有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ_{emt} と透水係数との関係をそれぞれ図 4.4-12, 図 4.4-13, 図 4.4-14, 図 4.4-15 に示す。

有効粘土間隙比 e_b 、有効モンモリロナイト間隙比 e_m 、吸水後の有効粘土間隙比 e_{bsat} 、有効ベントナイト密度（乾燥） ρ_b 、有効ベントナイト湿潤密度 ρ_{bt} 、有効モンモリロナイト密度（乾燥） ρ_{em} 、有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ_{emt} はそれぞれ図 4.4-6 に示した記号を用いて数式 4.4-4, 数式 4.4-5, 数式 4.4-6, 数式 4.4-7, 数式 4.4-8, 数式 4.4-9, 数式 4.4-10 のように表せる特性値である。

図 4.4-8~図 4.4-11 を比較すると、これらのグラフの形状は類似しており、単に横軸の数字が変更されただけの見かけとなった。それぞれのグラフの中で同じ横軸の値（例えば図 4.4-8 でいえば、有効粘土間隙比 $e_b=1.50$ ）の時に透水係数の分布幅が大きく、1~2桁の範囲に透水係数が分布していることも同じ傾向となった。間隙水を自由水・表面吸着水・モンモリロナイト中の層間水の三つに分類して自由水のみ部分に水が流れることを考慮しても、自由水と空気が占める間隙の割合に差が生じなかったためである。

次に密度等を指標とした図 4.4-12~図 4.4-15 の間で比較すると、有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ_{emt} の場合、同じ横軸レベルでの透水係数の分布幅（縦軸方向のプロット範囲）が若干狭くなっていることがわかる。いずれにせよ、間隙比や密度等の指標をそのまま適用するだけでは透水係数の代替指標として適用することは難しいと考えられる。

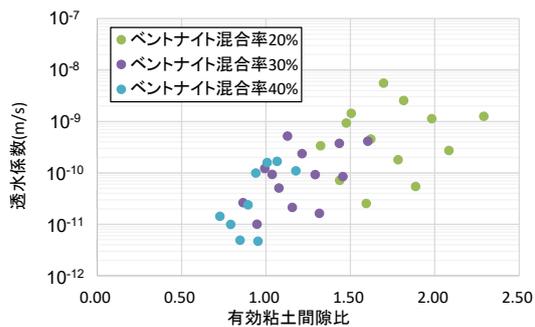


図 4.4-8 有効粘土間隙比 e_b と透水係数

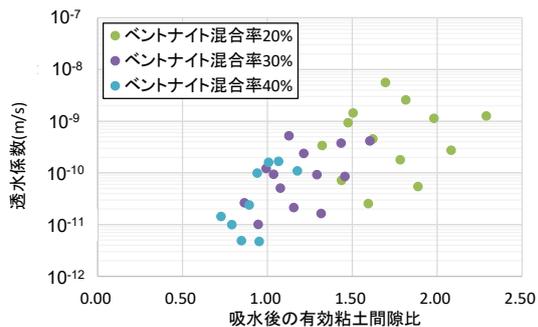


図 4.4-9 吸水後の有効粘土間隙比 e_{bsat} と透水係数

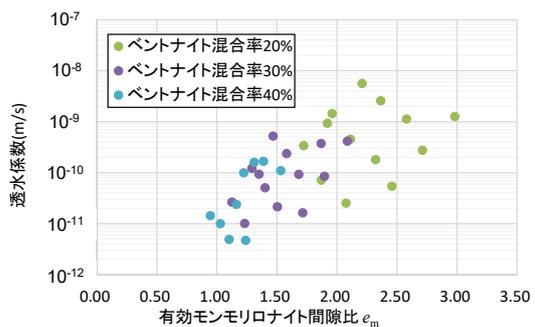


図 4.4-10 有効モンモリロナイト間隙比 e_m と透水係数

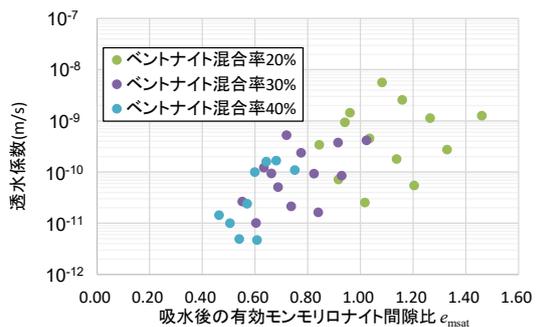


図 4.4-11 吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数 (図 4.3-7 の再掲)

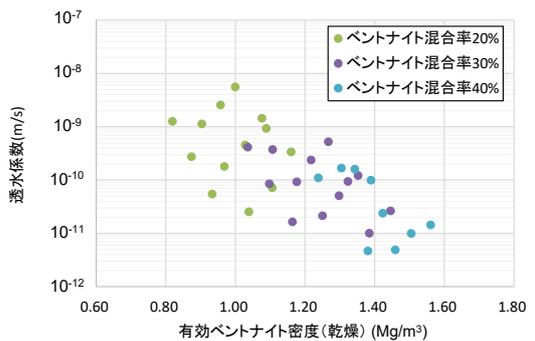


図 4.4-12 有効ベントナイト密度 (乾燥) ρ_b と透水係数

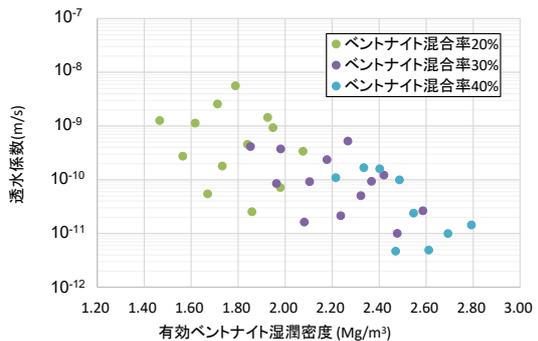


図 4.4-13 有効ベントナイト湿潤密度 ρ_{bt} と透水係数

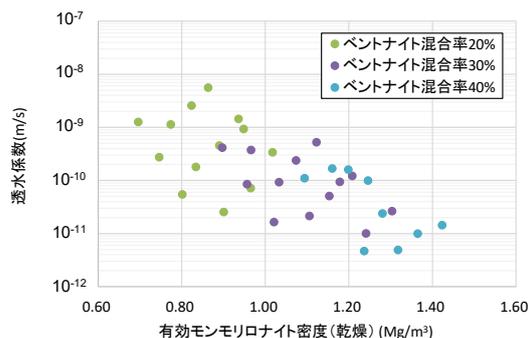


図 4.4-14 有効モンモリロナイト密度(乾燥) ρ_{em} と透水係数

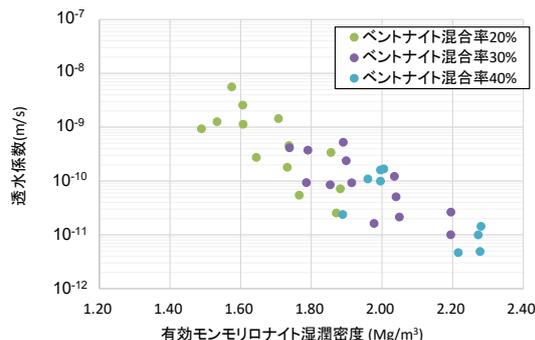


図 4.4-15 有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ_{emt} と透水係数

$$e_b = \frac{V_a + V_w}{V_m + V_{etc}} \quad \text{数式 4.4-4}$$

$$e_{bsat} = \frac{V_a + V_{wsat}}{V_m' + V_{etc}} \quad \text{数式 4.4-5}$$

$$e_m = \frac{V_a + V_w}{V_m} \quad \text{数式 4.4-6}$$

$$\rho_b = \frac{m_m + m_{etc}}{V_a + V_w + V_m + V_{etc}} \quad \text{数式 4.4-7}$$

$$\rho_{bt} = \frac{m_m + m_{etc} + m_w}{V_a + V_w + V_m + V_{etc}} \quad \text{数式 4.4-8}$$

$$\rho_{em} = \frac{m_m}{V_a + V_w + V_m} \quad \text{数式 4.4-9}$$

$$\rho_{emt} = \frac{m_m + m_w}{V_a + V_w + V_m} \quad \text{数式 4.4-10}$$

次節にて、代表例として吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} を元にした、透水係数と相関性の高い代替指標に関する考察を行う。

4.5 代替指標と透水係数の関係

龍岡らの研究¹³⁾より、締め固められた粘土・砂混合土の供試体において、低含水比の供試体では間隙空気圧と間隙水圧の差であるマトリックポテンシャルによるサクションが大きく¹⁴⁾、それに伴い粘土粒子が砂粒子の周辺に凝集することが考えられている。一方で、高含水比の供試体ではマトリックポテンシャルによるサクションが小さく、粘土粒子が間隙部に分散して存在することが考えられている。

本研究で取り扱うベントナイト混合土の場合、マトリックポテンシャル以外にも間隙水中の荷電イオンの影響である浸透ポテンシャルも無視できない。そのため両者の合計である水分ポテンシャルの影響を考慮する。水分ポテンシャルは含水比が小さいほど大きく、含水比の増加にしたがい水分ポテンシャルは減少していく。このような傾向はマトリックポテンシャルの場合と同じである。すなわち、龍岡らの研究で示された土中の土粒子の存在の仕方と間隙の関係はそのまま適用できると考えられる。

初期含水比の違いによる土中の土粒子の存在の仕方への影響に関する模式図を図 4.5-1 に示す。これらの初期含水比、すなわち締固め直後の飽和度の違いによるベントナイト粒子の分布形態の違いが、飽和過程における通水経路の形成に影響していると考えられる。図 4.5-1 の締固め曲線上の2点のように、同じ乾燥密度であれば間隙比、あるいは単位体積中の間隙の総量は同じはずである。そのため、間隙径の分布形状が低含水比の場合大きい径に多く分布し、高含水比の場合小さい径に分布すると思われる。

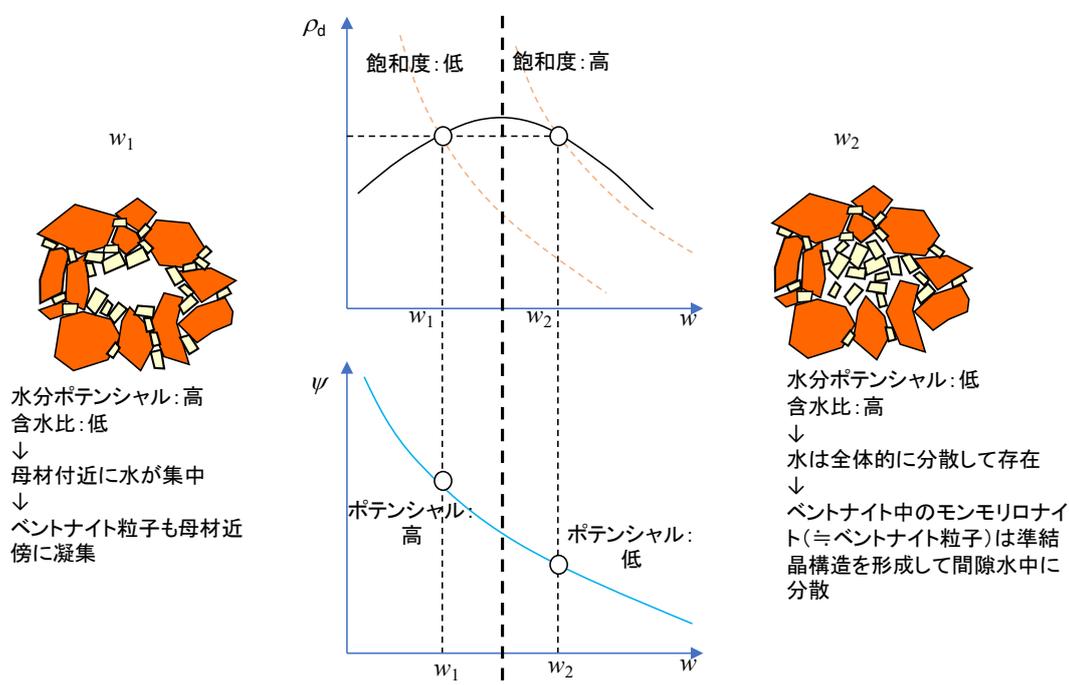


図 4.5-1 初期飽和度に影響する混合土中の間隙のモデル

そのため、図 4.1-1 や図 4.1-2 に示したように最大乾燥密度の時よりも若干湿潤側で透水係数が最小となる傾向と、飽和度との関係に着目し、吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数の関係を整理した。その結果を図 4.5-2 に示す。図 4.5-2 に使用している飽和度は通常の飽和度ではなく、モンモリロナイトの結晶層間への吸水や土粒子表面への吸着による減少を考慮した間隙と自由水の量との割合から算出した見かけ上の飽和度

(以下、有効飽和度とする) Sr' である。有効飽和度 Sr' は数式 4.5-1 のように表せる。数式 4.5-1 で用いている記号は、図 4.4-6 に用いたものと同じものである。

$$Sr' = \frac{V_{wsat}}{(V_{wsat} + V_a)} \quad \text{数式 4.5-1}$$

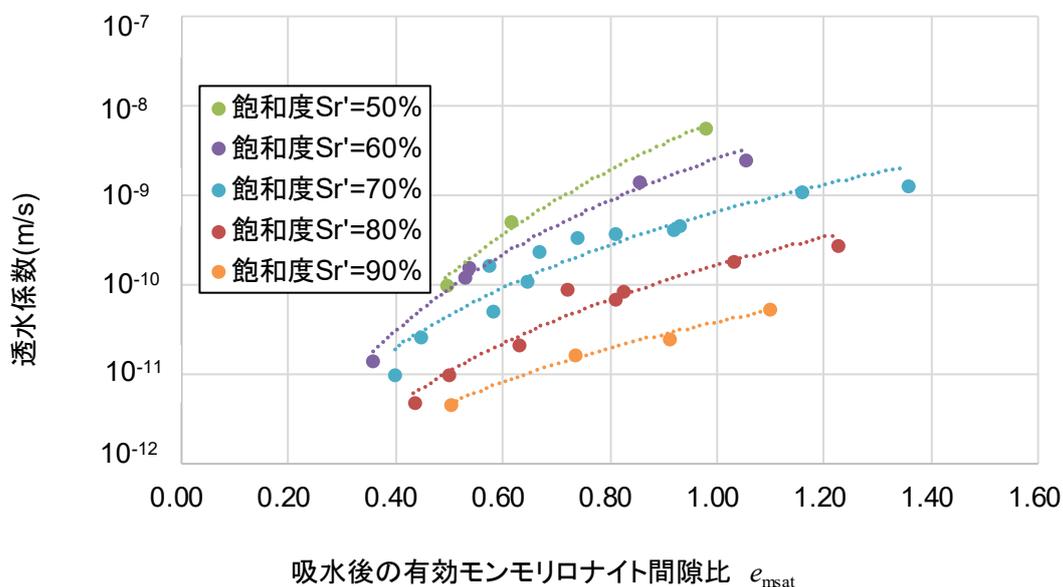


図 4.5-2 飽和度ごとの吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数の関係

図 4.5-2 のような整理により、有効飽和度 Sr' ごとにグループ分けできることがわかった。これは、図 4.5-1 で示したように、締固め直後の飽和度＝有効飽和度 Sr' が異なれば、通水前の不飽和状態における間隙の形状が異なることに起因すると考えられる。図 4.5-3 の上段に示すように、通水前の初期状態の有効飽和度が低い場合、ベントナイトが母材周辺に凝集するため、相対的に径が大きい間隙が形成され、この間隙は通水しやすいため透水係数が大きくなる。逆に通水前の初期状態の有効飽和度が高い場合にはベントナイトが母材との間隙に分散して分布するため、相対的に径が小さい間隙が分布し、この間隙を縫うようにして通水するため透水係数は小さくなると考えられる。

ただし、このようなメカニズムは Na 型ベントナイトを用いた場合のように、不飽和から飽和にいたる過程での通水中にベントナイトが膨潤する、すなわちモンモリロナイトの層間水量が締固め後の初期状態から大きく変化する場合には、その層間水の増加量の評価を適切に行う必要がある。また、通水させる水の塩分濃度などのイオン強度によっても層間水の増加量が異なることに留意する必要がある。

本研究では、Ca型ベントナイトを対象としており、モンモリロナイトの層間には水分子3層分のみが取り込まれ、それ以上は取り込まれないことが知られている^{3), 15), 16)}ので、不飽和から飽和に至る過程でのベントナイトの膨潤の影響を考慮していない。

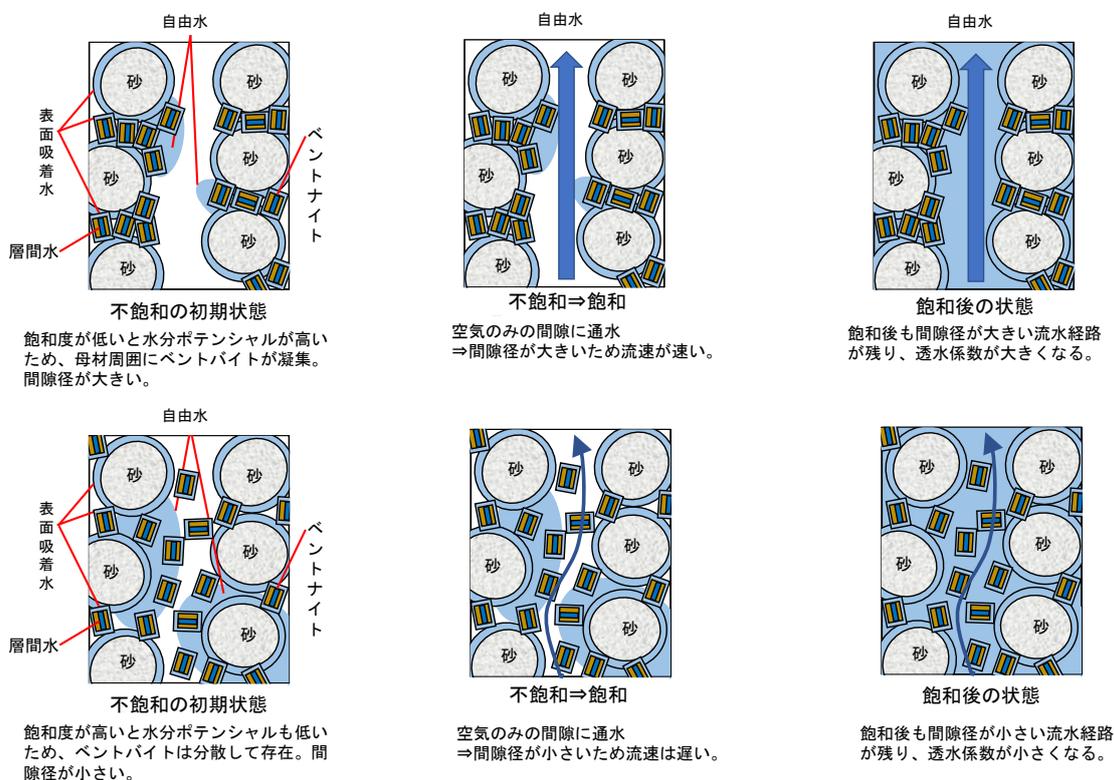


図 4.5-3 飽和に至る段階における通水経路の形成過程

浸潤前の有効飽和度が通水経路となる間隙径の分布が異なることより飽和後の透水係数へ影響し、同程度の飽和度条件下では透水係数と吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} との間に相関が高いことが明らかとなった。

そこで、吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} をベントナイトの吸水や土粒子表面への水の吸着を考慮した間隙と空気量との関係である見かけ上の飽和度 S_r' で正規化し、透水係数との関係を整理した。その結果を図 4.5-4 に示す。図 4.5-4 には施工試験後に回収した試料を用いた透水試験の結果も併記した。試験施工後の透水試験の結果も含め、見かけ上の飽和度 S_r' によらず、一つの相関曲線に沿う形で全プロットが分布した。相関曲線の式は数式 4.5-2 のように表され、決定係数 R^2 は $R^2=0.873$ と高い相関性を示す。

図 4.5-4 に示した結果より、吸水後の飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' は透水係数の代替指標指標として使えるといえる。

$$k_{15} = 0.5706 \times e_{msat}'^{4.9131} \quad \text{数式 4.5-2}$$

数式 4.5-2 に示した相関式の上下を挟む点線は、95%信頼区間の上限値と下限値を示すもので、95%の確立で相関式がこの範囲内に入ることを示したものである。これは、同じデータセットを用いて相関式を仮に 100 回求めた際に、95 回はこの信頼区間の範囲内に出現することを表し、相関式の実現可能性が高い範囲を示す。95%信頼区間の上下限の幅が 1 オーダー以下であり、透水係数の換算値のばらつきは本研究では考慮しないこととした。

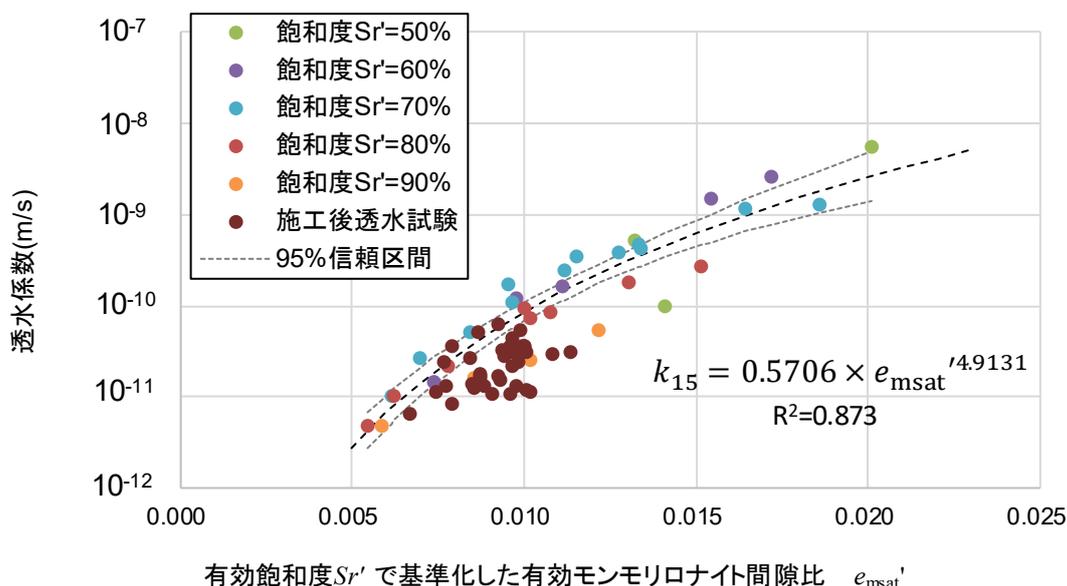


図 4.5-4 有効飽和度 Sr' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数の関係

ここで、同様の整理を図 4.4-8～図 4.4-15 および数式 4.4-4～数式 4.4-10 で示した代替指標についても適用した。その結果を図 4.5-5～図 4.5-12 に示す。

図 4.5-5～図 4.5-8 に示した間隙比を元に算出した特性値は、どれも有効飽和度 Sr' で正規化すると精度よく透水係数の推定ができることが分かった。有効飽和度 Sr' を算出し、正規化することで代替指標として用いることができることを確認できた。

図 4.5-9～図 4.5-12 に示した密度を元に算出した特性値は、有効飽和度 Sr' で正規化するとどれも有効飽和度 Sr' ごとに分類されるようになった。このことより、有効ベントナイト密度（乾燥・湿潤とも）および有効モンモリロナイト密度（乾燥・湿潤とも）と有効飽和度 Sr' で正規化する方法との相性はよくないことがわかる。

本研究では、図 4.5-5～図 4.5-8 に示した間隙比を元に算出した特性値のうち、図 4.5-4 に示した吸水後の飽和度 Sr' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数の関係を採用する。

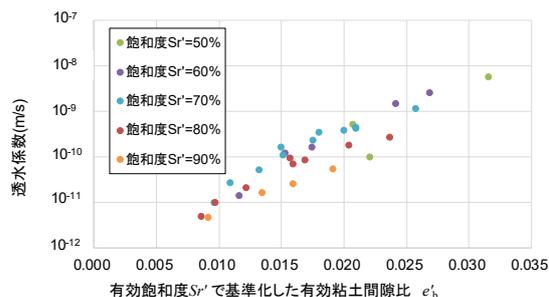


図 4.5-5 有効飽和度で正規化した有効粘土間隙比 e'_b と透水係数の関係

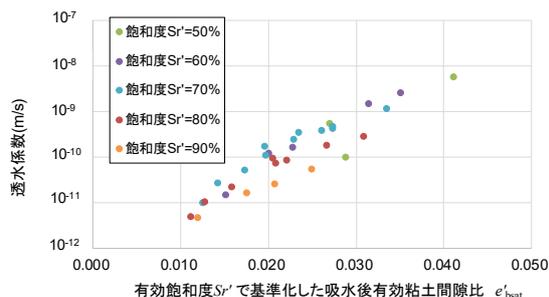


図 4.5-6 有効飽和度で正規化した吸水後の有効粘土間隙比 e'_{bsat} と透水係数の関係

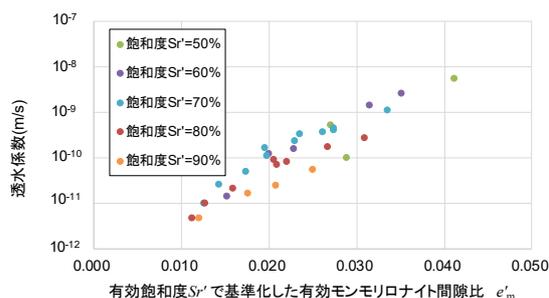


図 4.5-7 有効飽和度で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e'_m と透水係数の関係

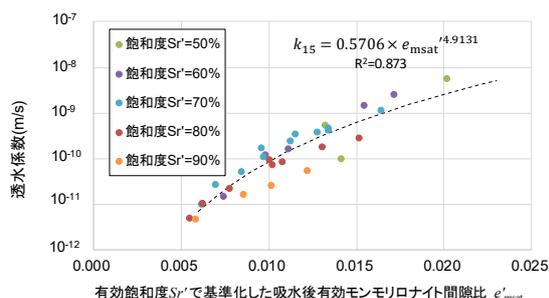


図 4.5-8 有効飽和度で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e'_{msat} と透水係数の関係

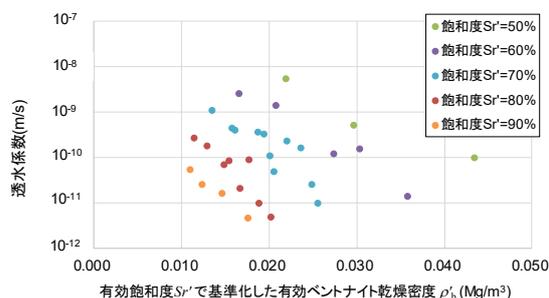


図 4.5-9 有効飽和度で正規化した有効ベントナイト乾燥密度 ρ'_b と透水係数の関係

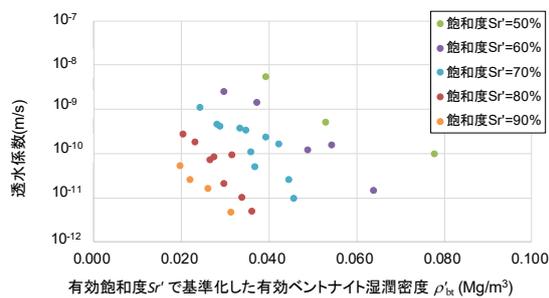


図 4.5-10 有効飽和度で正規化した有効ベントナイト湿潤密度 ρ'_{bt} と透水係数の関係

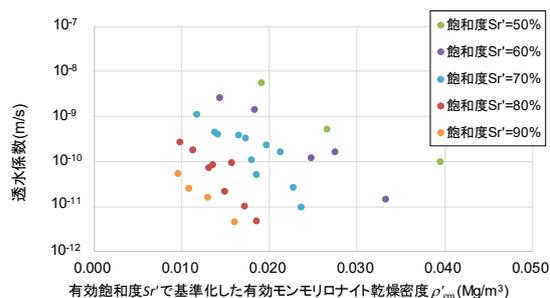


図 4.5-11 有効飽和度で正規化した有効モンモリロナイト乾燥密度 ρ'_{em} と透水係数の関係

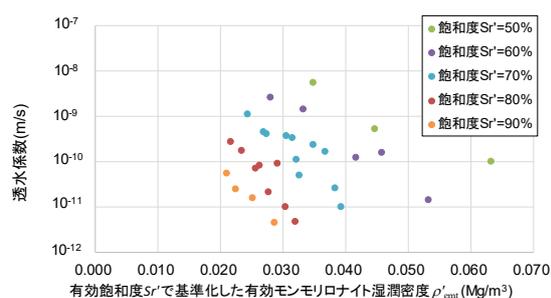


図 4.5-12 有効飽和度で正規化した有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ'_{emt} と透水係数の関係

4.6 現場採取データを用いた代替指標の値の算出方法

次に、現場で測定できる乾燥密度や含水比などのデータから吸水後の飽和度 Sr' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} を求める方法についてまとめる。以下に手順を示す。

1. 現場密度試験等により、湿潤密度・含水比・乾燥密度を求める。ベントナイト混合土の製造時の品質確認で測定したベントナイトの混合率も求めておく。
2. 単位体積中の質量を求める。乾燥密度と湿潤密度の差より水の質量 m_w を乾燥密度とベントナイトの混合率よりベントナイトの質量 m_b と砂の質量 m_s を求める。さらに、ベントナイトの質量 m_b とベントナイト中のモンモリロナイト含有率 c_m よりモンモリロナイトの質量 m_m とベントナイト中の随伴鉱物の質量 m_{etc} を求める。

この時、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 c_m はメチレンブルー吸着試験により MBC (単位は mmol/100g) を求め、モンモリロナイト 100% の時の MBC=140 mmol/100g との比より求める。メチレンブルー吸着試験の実施が困難な場合、ミルシートより MBC を確認する。ミルシートに MBC の記載がない場合は、以下の値を参考にするとよい。

山形県産 Ca 型ベントナイト ; MBC=110 mmol/100g, $c_m=78.9\%$

3. 単位体積中の体積比を求める。モンモリロナイトが水分を吸水膨潤したり、土粒子表面に見水分が付着し間隙中の水分量が増えるため、まずこれらの算定を行う。
 - 3-1. 数式 4.4-1 より単位体積あたりの層間容積の増加量を計算する。単位体積あたりの層間容積の増加量は $0.376 \text{ cm}^3/\text{g}$ であるから、これに単位体積当たりのモンモリロナイトの質量 m_m を掛ける。
 - 3-2. 土粒子表面に付着した水分量はベントナイト・砂の比表面積 S に単位体積当たりのベントナイトの質量 m_b ・砂 m_s の質量と吸着水の層厚 (ベントナイトの場合 12.0\AA , 砂の場合 2.8\AA) をそれぞれ掛けて求める。

- 3-3. 吸水前のモンモリロナイトの単位体積中の体積比 V_m を求める。単位体積中のモンモリロナイトの質量 m_m をモンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m で除して求める。
- 3-4. 吸水後のモンモリロナイトの単位体積中の体積比 V_m' を求める。吸水前のモンモリロナイトの単位体積中の体積比 V_m に 3-1. で求めた層間容積の増加量を加えて求める。
- 3-5. モンモリロナイト中の随伴鉱物の体積比 V_{etc} を求める。単位体積中のモンモリロナイト随伴鉱物の質量 m_{etc} をモンモリロナイト随伴鉱物の土粒子密度 ρ_{etc} で除して求める。モンモリロナイト随伴鉱物の土粒子密度 ρ_{etc} は、ベントナイトの土粒子密度 ρ_b がモンモリロナイトの土粒子密度 ρ_m とモンモリロナイト含有率 C_m の積とモンモリロナイト随伴鉱物の土粒子密度 ρ_{etc} と随伴鉱物の含有率 $(1-C_m)$ の積の和であることより算定する。モンモリロナイト随伴鉱物の土粒子密度 ρ_{etc} の算定式を数式 4.6-1 に示す。

$$\rho_{etc} = \frac{\rho_b - \rho_m \cdot C_m}{(1 - C_m)} \quad \text{数式 4.6-1}$$

- 3-6. 土粒子表面付着水の単位体積中の体積比 V_w' を求める。3-2. で求めた水分量に水の密度 ρ_w を除して求める。
- 3-7. 単位体積中の砂の体積比 V_s を求める。単位体積中の砂の質量 m_s を砂の土粒子密度 ρ_s で除して求める。
- 3-8. 吸水・吸着を考慮した後の単位体積中の水の体積比 V_{wsat} を求める。水の質量 m_w から 3-1., 3-2. で求めた吸水量と吸着水量を引き、水の密度 ρ_w で除して求める。
- 3-9. 最後に単位体積中の空気の体積比 V_a を求める。1 より V_m' , V_{etc} , V_w' , V_s , V_{wsat} の各値を引いて求める。
- 4. 数式 4.4-3 より吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} を求める。
- 5. 吸水・吸着により減少した間隙における有効飽和度 S_r' を $S_r' = V_{wsat} / (V_{wsat} + V_a)$ より求める。
- 6. 正規化した吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' を吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} を吸水・吸着により減少した間隙における有効飽和度 S_r' で除して求める。
- 7. 正規化した吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数との関係をプロットする。

以上の手続きのフロー図を図 4.6-1 に示す。

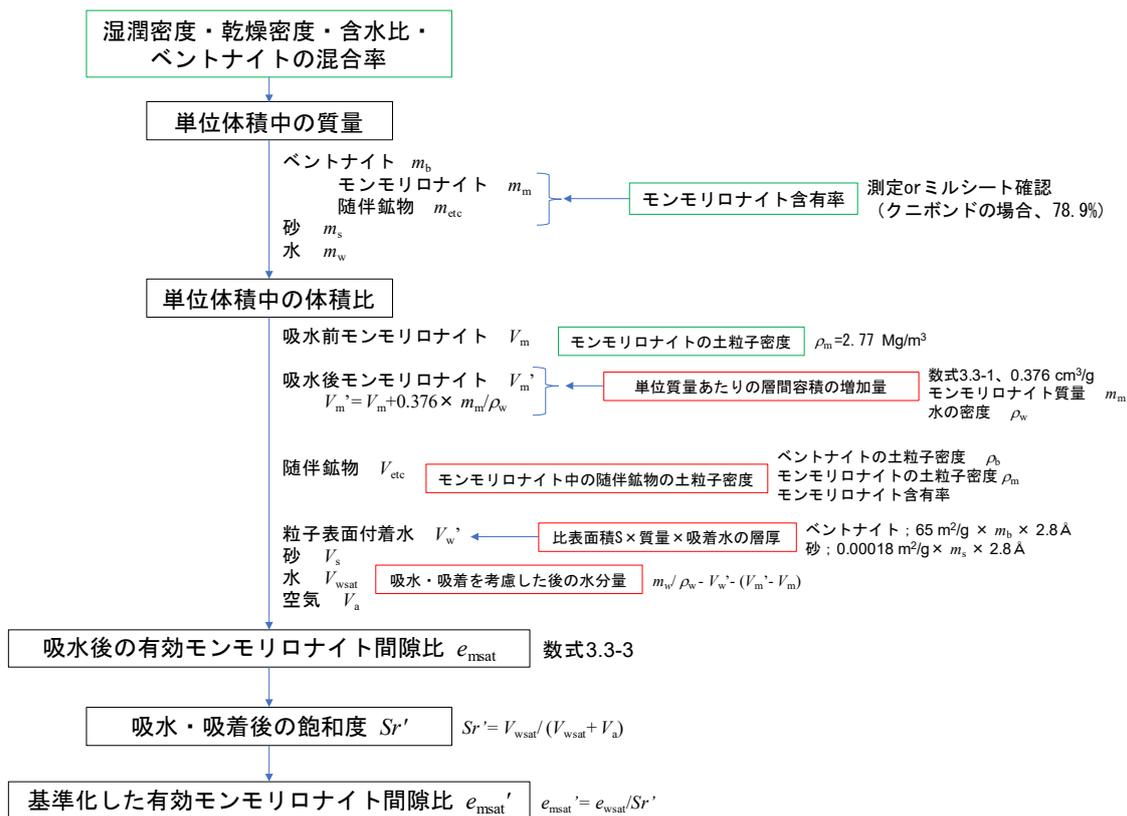


図 4.6-1 吸水後の有効モンモリロナイト間隙比の算定フロー図

4.7 4章のまとめ

本章では、施工段階における品質確認試験のデータ（乾燥密度・含水比・混合率等）を用いて素早く透水係数を評価するための代替指標について検討を行った。

本研究では、まず中深度処分での使用が計画されている Na ベントナイトのみの場合を考慮した。ベントナイトの乾燥密度と透水係数との間の相関関係は小峯らの研究により理論的にも明らかとなっており、本研究では小峯らの研究を参照し、締め固めた Na ベントナイトへ適用可能であることを確認した。

次に、Ca 型ベントナイトを品配合で混合したベントナイト混合土の代替指標の検討を行った。ベントナイト混合土中の通水経路を考慮し、間隙比が透水性に影響すると関わると考えられたので、間隙比にかかる特性値をベースに代替指標として選定した。

また、間隙中を満たす水の存在形態について、自由に移動できる状態の自由水、モンモリロナイトの結晶層間に取り込まれた状態の層間水、土粒子表面に吸着した状態の吸着水の三つの状態を考慮した。そして、層間水はモンモリロナイトの体積を増加させるものとして混合土中の全間隙より削除しモンモリロナイトの体積に加えた。さらに、吸着水は通水に関わらない間隙として、混合土中の全間隙より削除した。このように通水に関わる間隙と吸水膨潤後のモンモリロナイトの体積比を「吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} 」として定義した。

吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数の関係を整理した結果、有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数との間の相関性は、有効飽和度 S_r' ごとに整理できることがわかった。有効飽和度 S_r' とは、モンモリロナイトの吸水膨潤と土粒子表面への水の吸着による影響を考慮した間隙と自由水の体積比と定義した。

有効飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数との間の相関性は良好で、決定係数 R^2 は、 $R^2=0.8676$ と高い相関性を示した。さらに、有効飽和度 S_r' で整理することにより、有効粘土間隙比、有効モンモリロナイト間隙比等も透水係数の代替指標となりうることを示した。本研究ではこの結果より、有効飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' を代替指標として提案した。ただし、有効飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' は、層間水の量に上限値が存在する Ca 型ベントナイトに限り有効な整理方法であることを注意を要する。

有効ベントナイト密度、有効モンモリロナイト密度等の密度をベースにした諸特性は有効飽和度 S_r' で整理する方法との相性は悪く、透水係数との相関性が有効飽和度 S_r' ごとに分別される結果となった。

最後に、現場での施工データや工場出荷時のミルシートのデータより、有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' や有効飽和度 S_r' を算出する手順をまとめ、施工時の品質確認に代替指標を活用する方法を提案した。

第4章 参考文献

- 1) Komine, H. : Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE)* 134 (4), 497–508., 2008
- 2) 水熱科学ハンドブック編集委員会 1997. 水熱科学ハンドブック, 技報堂出版.
- 3) 佐藤邦明・室田明 1971. 吸着効果を受ける微速浸透流に関する実験的研究, 土木学会論文報告集第195号.
- 4) 千々松正和, 木村誠, 庭瀬一仁, 工藤淳, 矢込吉則, 河原忠弘: 低配合ベントナイト混合土の現場施工試験における透水試験結果と配合設定に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会概要集, CS13-009, pp.17-18, 2012.9.
- 5) 趙小夫, 浦野紘平, 小笠原貞夫: 湿潤状態におけるモンモリロナイト系粘土鉱物の性状, 日本化学会誌, 1989, (2), p.209~215)
- 6) Komine, H., and Ogata, N. : New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Can. Geotech. J.*, 40 2, 460–475, 2003.
- 7) Mitchell, J.K. : *Fundamentals of soil behavior (Second Edition)*, John Wiley & Sons, Inc., pp.111-130, 1993.
- 8) 上平恒: 水の物性と構造, 化学と教育 43巻8号, pp.494-500, 1995
- 9) 小峯秀雄: 拡散二重層理論の適用限界の観点からのベントナイトの締固め特性の評価, 土木学会第58回年次学術講演会概要集, CS7-009, pp.295-296, 2003.9.
- 10) 公益社団法人地盤工学会 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会: 低透水性土質系材料の活用と性能評価技術に関する研究委員会 研究報告書, 地盤工学会, pp.44~94, 2016.12.
- 11) 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, 2005.
- 12) 田中俊行, 戸井田克: 礫-砂-ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法, 土木学会論文集 C, Vol.64 No.1, pp.101-110, 2008.8
- 13) Fumio Tatsuoka, Kenji Fujishiro, Kazuyoshi Tateyama, Shohei Kawabe, Yoshiaki Kikuchi : Properties of compacted soil as a function of dry density and the degree of saturation, *The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 2 Issue 4* pp.247~252, 2015.
- 14) 北村良介, 酒匂一成: 不飽和土の力学特性について~斜面安定解析への適用を視野に入れて~, 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2014.
- 15) 須藤竣男: 粘土鉱物学, 岩波書店, pp.238-239, 1974.
- 16) Takashi Watanabe, Tsutomu Sato : EXPANSION CHARACTERISTICS OF MONTMORILLONITE AND SAPONITE UNDERVARIOUS RELATIVE HUMIDITY CONDITIONS, *Clay Science* 7, pp.129-138, 1988.

第5章

施工後土構造物の 透水性の評価

5.1 施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法の概要

本研究では地球統計学的手法により三次元空間分布モデルを作成し、この空間モデルを用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施するものである。

本研究における施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法は、透水係数の三次元空間への配置を数値解析により作成し構造物全体のモデルを作成することを第一ステップとする。この時、透水係数は施工後のデータと第4章で示した代替指標との相関性より求める。透水係数を配置した三次元モデル空間を用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施し、マクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）により透水性を評価するというものである。

第2章で示した中深度処分施設処分の低透水層における透水係数の代替指標は乾燥密度であり、乾燥密度の空間分布をモデル化できれば透水係数の分布もモデル化できる。また、コアカッター法で測定した乾燥密度は目標値である $1.6 \pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ を十分に満たす施工結果であったことより、透水性能も十分に満足できていると予測できる。

一方、第3章で示した浅地中ピット処分施設の低透水層の施工後の乾燥密度は測定した供試体の全数が目標を満足する結果ではなかったため、土構造物全体での透水性能を評価する必要がある。また、浅地中ピット処分施設の低透水層における透水係数の代替指標は乾燥密度以外にもベントナイトの混合率や含水比にも影響を受けるため、第4章で示したような相関関係が必要となる。そのため、本章では、モデル化の難易度が高い浅地中ピット処分施設の低透水層を対象として検討を進めるものとする。

以下に、地球統計学的手法によるモデル化や浸透流解析に関する基本的な考え方などをまとめる。

5.1.1 地球統計学的手法による測定点以外のデータ予測

締め固めた粒状ベントナイト地盤の透水モデルを、地盤統計学的手法により不均一性を考慮して評価した事例¹⁾を参考にし、転圧後のベントナイト混合土地盤に対して適用する。本研究では、地盤統計学的手法としては、クリギング法と条件付きシミュレーションを採用する。

地盤統計学的手法では、実データにフィットするバリオグラムモデルを設定（バリオグラムモデル選択）し、そのモデルを適用して予測地点における予測値を計算する（予測とシミュレーション）。バリオグラムモデルとは、データの相関性に関するモデルであり、後述のとおり複数種類が提唱されている²⁾。

予測値の計算では、バリオグラムモデルに対して最も適切とみなせる解を計算する方法（予測）および対象となる変数が確率変数（値に対する確率が存在する変数）であることを考慮し、乱数により多数の解を計算する方法（シミュレーション）がある。それらを合わせて「予測とシミュレーション」としている。本研究では、「予測」にあたるクリギング法は、その結果が不確実性を含むことを考慮し、その後実施するシミュレーションの入力条件

として用いることとする。

シミュレーションの一つである条件付きシミュレーションは、測定値のある箇所はそれをそのまま採用し、それ以外では予測値を算出するものである。本研究におけるクリギングの主な処理を図 5.1-1 に示す。クリギングでは、最初に対象となる実データ値を選択した後、「バリオグラムモデル選択」→「予測とシミュレーション」を行う。

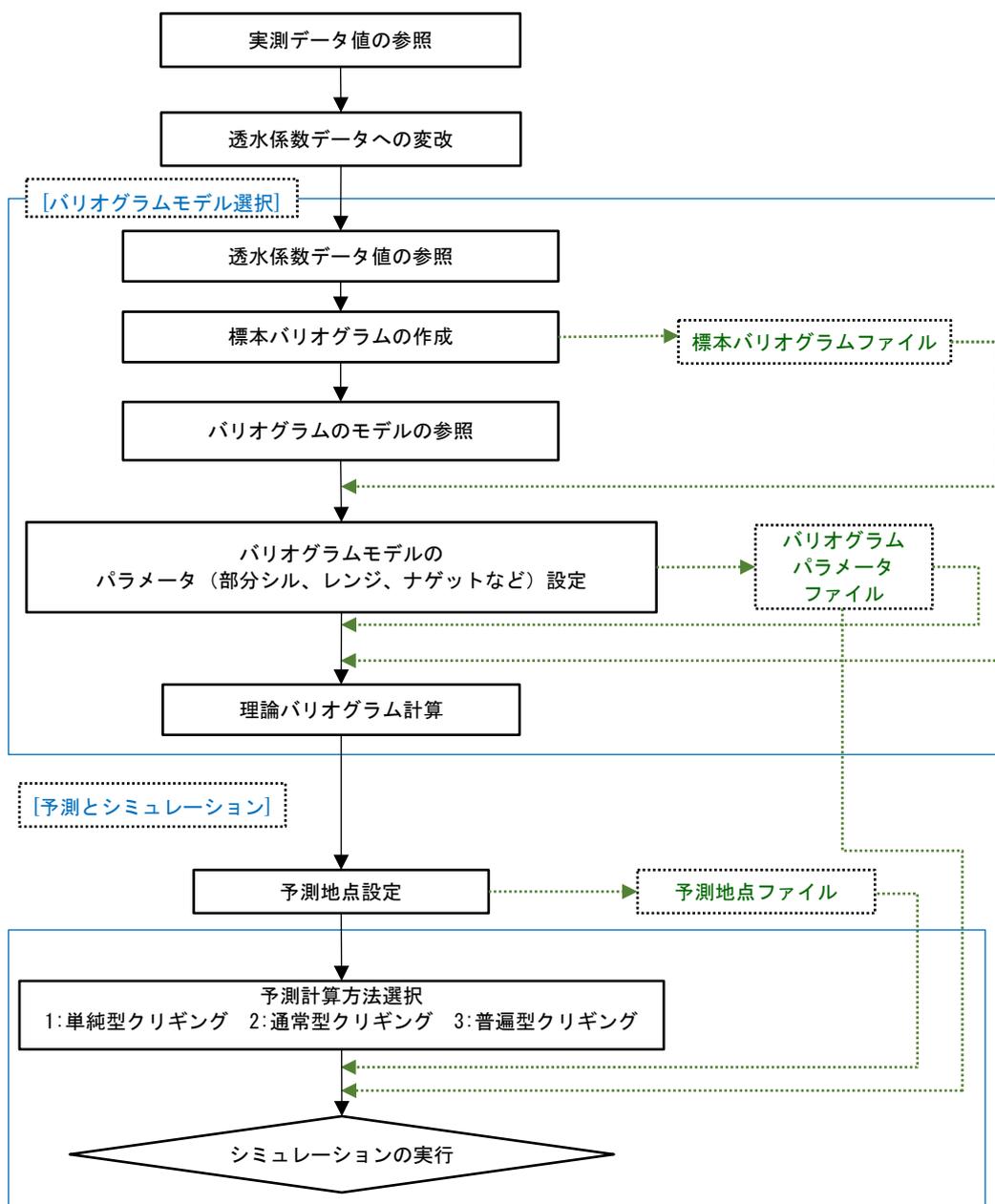


図 5.1-1 本研究におけるクリギングの主な処理

5.1.1.1 クリギング法の概要

クリギング法²⁾では、対象位置 \vec{x} （位置は3次元ベクトルで表示）における変数 $Z(\vec{x})$ を確率変数であるとする。また、実データ値は、測定位置における変数の確率分布に従った多くの可能性の中から、たまたま一つの値が実現された値（実現値）とみなす。

クリギングでは、計算対象となる位置に対し、実データ値から推定された値が求められる。この値は、確率を考慮して予測された値であるため、「予測値」と呼ばれる。また、計算対象箇所は、「予測地点」と呼ばれる。この点において、実データ値から値を一意的に決定する「線形補間による内挿」などと異なっている。

クリギングでは、実データ値にフィットするバリオグラムモデル（データの相関性に関するモデル）を設定し、そのバリオグラムモデルに対して、予測計算を行う。本研究では、前者を「バリオグラムモデル選択」、後者を「予測とシミュレーション」と呼ぶ。予測計算では、最も適切とみなせる解を計算する方法（予測）、対象となる変数が確率変数である事を考慮し、乱数により多数の解を計算する方法（シミュレーション）があり、それらを合わせて「予測とシミュレーション」としている。

5.1.1.2 バリオグラムモデル

クリギングに使用できるバリオグラムモデルは複数種類あり、また各モデルはパラメータを設定する必要がある。ここでは、バリオグラムモデルの概要とパラメータの設定について説明する。

(1)標本バリオグラムの作成

標本バリオグラム²⁾は、全データ点から抽出したペア（2点の組み合わせ）に対し、距離、および実データ値の相関を示すグラフである。ペアは、距離が近いほど、実データ値の相関が強い（実データ値の差が小さい）が、ある程度距離が遠くなると、実データ値は相関が無くなると考えられる。

このようなペアの距離に対する値の相関度を表す値がセミバリオグラム値であり、数式5.1-1で求められる。なお、この式では、2点*i*、および*j*について、点*i*の位置ベクトルを \vec{x}_i 、点*j*の位置ベクトルを $\vec{x}_i + \vec{h}$ としており、ベクトル \vec{h} は、点*i*→点*j*間のベクトルである。また、セミバリオグラム値の2倍は、バリオグラム値と呼ばれる。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} [z(\vec{x}_i + \vec{h}) - z(\vec{x}_i)]^2 \quad \text{数式 5.1-1}$$

ここで、

$z(x_i)$: 位置ベクトル \vec{x}_i における実データ値（透水係数の測定値など）

\vec{h} : セミバリオグラム値を計算するペア間のベクトル

$\gamma(h)$: 2点間距離 $h = |\vec{h}|$ のペアにおけるセミバリオグラム値

標本バリオグラムは、「経験バリオグラム」とも呼ばれる。標本バリオグラムは、データから求めたセミバリオグラム値を使用するのに対し、バリオグラムモデルから計算したセミバリオグラム値を示すグラフは、「理論バリオグラム」と呼ばれる。

標本バリオグラムのタイプとして、「バリオグラム雲」、または「区間合算バリオグラム」に分けられる。バリオグラム雲は、全データのセミバリオグラム値を一括して表示する。そのため、全体の傾向が把握しづらい。一方、距離を複数の区間に分割し、その距離区間に該当する標本（ペア）をサンプリングして平均値を採る方法が区間合算バリオグラムである。区間合算バリオグラムは、以下の式から計算する。区間*i*の標本バリオグラムをプロットする場合、距離は区間中央値とする。同じデータからバリオグラム雲、および区間合算バリオグラムを作成した例を図 5.1-2 に示す。本研究では、区間合算バリオグラムを作成して検討を進める。

$$\hat{\gamma}_k = \frac{1}{2n_k} \sum_{i=1}^{n_k} [z(\bar{x}_i + \vec{h}) - z(\bar{x}_i)]^2 \quad \text{数式 5.1-2}$$

ここで、

n_k : 区間*k*における標本数 $\hat{\gamma}_k$: 区間*k*における標本バリオグラム

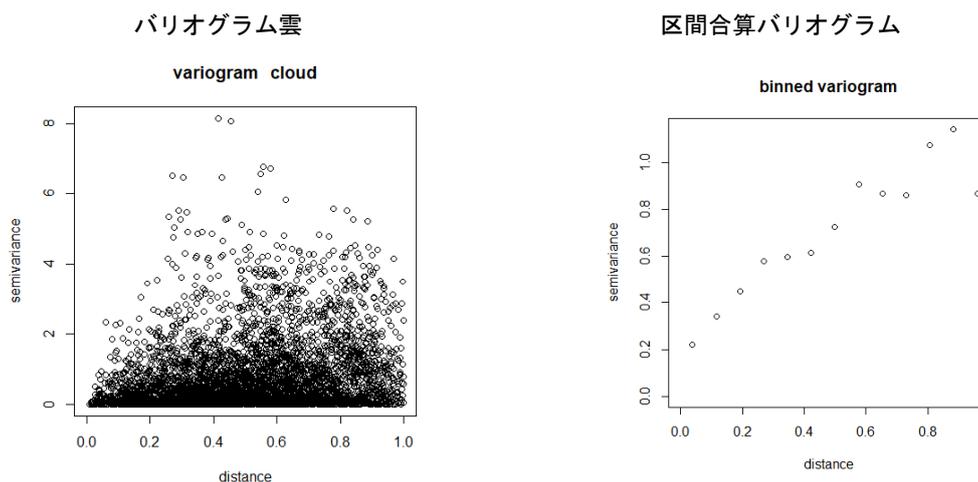


図 5.1-2 標本バリオグラム見本

(2)バリオグラムモデルの種類

バリオグラムモデル³⁾は、距離とセミバリオグラム値の関数であり、ここでは、①球形モデル、②円形モデル、③cubicモデル、④ガウスモデル、⑤指数モデル、⑥べき乗モデル、⑦線形モデル、⑧ナゲット効果モデルを紹介する。バリオグラムにおけるパラメータの概念

を図 5.1-3 に示す。

標本バリオグラムは、図 5.1-3 に示すように距離が大きくなると、2点間の相関性が無くなるため、セミバリオグラム値が一定値になる傾向がある。セミバリオグラム値が一定になる距離は「レンジ」、一定になるセミバリオグラム値は「シル」と呼ばれる。

本来、距離がゼロの場合、セミバリオグラム値がゼロになるが、実データ値の誤差などにより、図 5.1-3 に示す距離ゼロにおけるセミバリオグラム値が発生する。この値は、「ナゲット」と呼ばれ、シルからナゲットを差し引いた値は、「部分シル」と呼ばれる。バリオグラムにおける主なパラメータは、部分シル、レンジ、ナゲットである。本研究では部分シルとナゲットの合計であるシルをパラメータとして使用する。これは、レンジの値がバリオグラムモデルに与える影響が大きいことや、現場で測定される乾燥密度の値が測定誤差と空間的なばらつきの両方を含んだものであり、全く同じ位置の採取できないのでナゲットの適切な評価ができないと考えたためである。

数式 5.1-3～数式 5.1-10 にバリオグラムモデルごとの計算式を示す。また、図 5.1-4 にバリオグラムモデルごとの理論バリオグラム計算例を示す。この例は、部分シル：9、ナゲット：1、シル：10、レンジ：1.5、で計算した値である。グラフには、シルであるセミバリオグラム値：10、およびレンジである距離 1.5 に補助線を引いている。

バリオグラムモデル①～③により計算される理論バリオグラムは、レンジ以上の距離で値がシルになる特徴を有する。一方、④～⑦のモデルは、距離がレンジより大きくなっても、セミバリオグラム値は増加し続ける。また、⑧ナゲット効果モデルは、距離ゼロ以外のセミバリオグラム値を一定としている。

本研究では、指数モデルを採用することとした。

① 球形モデル (spherical)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \left[1.5 \frac{h}{\phi} - 0.5 \left(\frac{h}{\phi} \right)^3 \right] \quad (h < \phi) \quad \text{数式 5.1-3}$$

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \quad (h \geq \phi)$$

τ^2 : ナゲット σ^2 : 部分シル ϕ : レンジ

② 円形モデル(circular)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{\phi} \right) + \frac{2h}{\pi\phi} \sqrt{1 - \left(\frac{h}{\phi} \right)^2} \right] \quad (h < \phi) \quad \text{数式 5.1-4}$$

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \quad (h \geq \phi)$$

③ cubic モデル(cubic)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \left[7 \left(\frac{h}{\phi} \right)^2 - 8.75 \left(\frac{h}{\phi} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{\phi} \right)^5 - 0.75 \left(\frac{h}{\phi} \right)^7 \right] \quad (h < \phi) \quad \text{数式 5.1-5}$$

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \quad (h \geq \phi)$$

④ ガウスモデル(gaussian)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h}{\phi} \right)^2 \right] \right\} \quad \text{数式 5.1-6}$$

⑤ 指数モデル(exponential)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 \left[1 - \exp \left(- \frac{h}{\phi} \right) \right] \quad \text{数式 5.1-7}$$

⑥ べき乗モデル(power)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 h^\phi \quad \text{数式 5.1-8}$$

⑦ 線形モデル(linear)

$$\gamma(h) = \tau^2 + \sigma^2 h \quad \text{数式 5.1-9}$$

⑧ ナゲット効果モデル(pure.nugget)

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \tau^2 && (h=0) \\ \gamma(h) &= \tau^2 + \sigma^2 && (h>0) \end{aligned} \quad \text{数式 5.1-10}$$

なお、セミバリオグラム値は、共分散関数と数式 5.1-11 で関係づけられる。

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) + \tau^2 \quad \text{数式 5.1-11}$$

ここで、

$C(h)$: 2点間距離 $h=|h^*|$ のペアにおける共分散関数

例えば、本研究で採用した指数モデルの共分散関数は、数式 5.1-12 のようになる。

$$C(h) = \sigma^2 \left[1 - \exp \left(- \frac{h}{\phi} \right) \right] \quad (h < \phi) \quad \text{数式 5.1-12}$$

$$C(h) = 0 \quad (h \geq \phi)$$

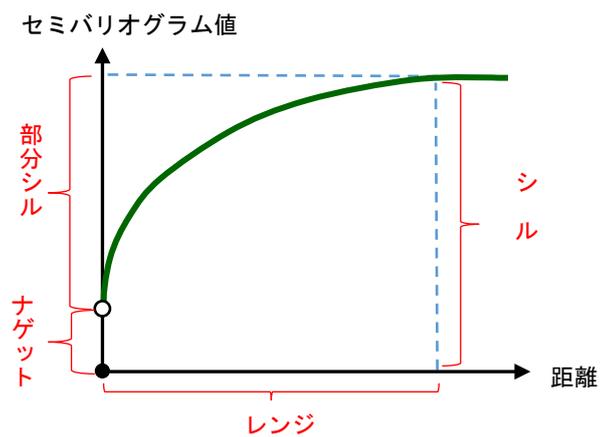


図 5.1-3 バリオグラムにおけるパラメータの概念図

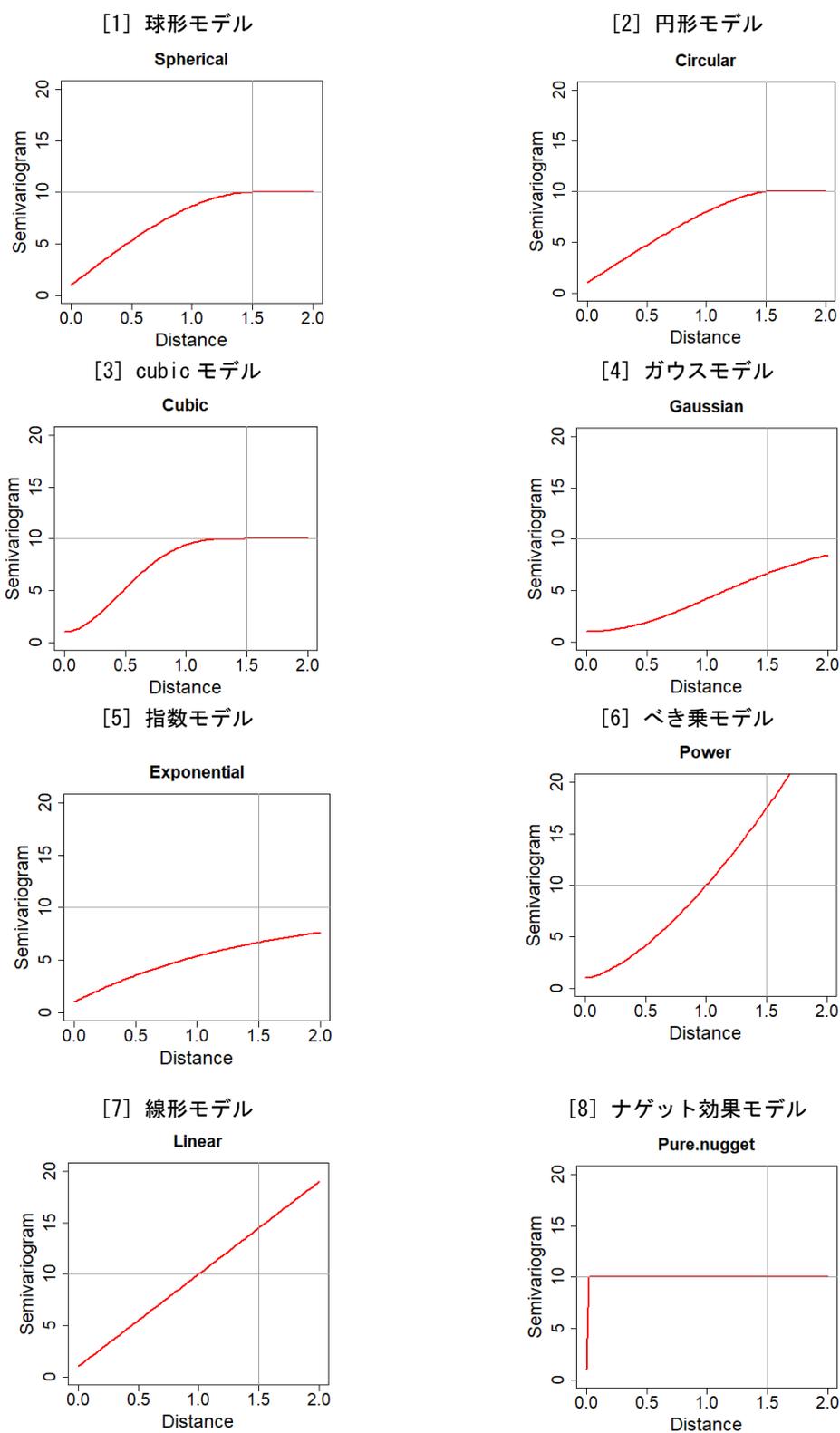


図 5.1-4 バリオグラムモデルごとの理論バリオグラム計算例

(3)バリオグラムモデルのパラメータ設定

バリオグラムモデルの主なパラメータは、①レンジ、②部分シル、③ナゲット（②と③を合わせてシル）の3種類である。パラメータの推定方法としては、最小二乗法による推定、および最尤推定による推定の2種類がある。前者は、予測値と実データ値の差が最小になるようにパラメータを決める方法であり、後者は、実データ値が発生する確率（尤度）が最大となるようにパラメータを決める方法である。本研究では最尤推定法⁴⁾を採用した。

最尤推定法は、尤度が最大となるようにパラメータを決める方法である。最尤推定法は、対象となる変数におけるバリオグラムモデルのパラメータ（分散値）、および変数の平均値に関する尤度が最大なるようにパラメータ、平均値を同時に求める方法である。

確率場 $Z(x)$ が正規性をもてば、データ $\mathbf{Z} = (Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n))^T$ はn次元正規分布に従い、その密度関数は数式 5.1-13 のような形を持つ。

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi^{n/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad \text{数式 5.1-13}$$

ここで、 $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T = \mathbf{E} \mathbf{Z}$: 平均ベクトル、 $\Sigma = \mathbf{E}(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu})^T$: 共分散行列、 $|\Sigma|$: 共分散行列の行列式

もし $Z(x)$ が平均 μ 、共分散関数 $C(h)$ を持つ2次定常確率場であれば、

$$\boldsymbol{\mu} = \mu \mathbf{1} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T \quad \text{数式 5.1-14}$$

$$\Sigma = \left(C(x_i - x_j) \right)_{1 \leq i, j \leq n} \quad \text{数式 5.1-15}$$

となる。クリギング法に登場する共分散関数は、通常一つの関数を $C_0(h)$ 用いて数式 5.1-16、数式 5.1-17 のように表現されることが多い。

$$C(h) = \tau^2 + \sigma^2 C_0(\mathbf{0}) \quad (\mathbf{h} = \mathbf{0}) \quad \text{数式 5.1-16}$$

$$C(h) = \sigma^2 C_0(\phi h) \quad (\mathbf{h} \neq \mathbf{0}) \quad \text{数式 5.1-17}$$

したがって共分散関数を $\Sigma(\phi) = C_0(\phi(x_i - x_j))$ とおけば、数式 5.1-18 のようになる。

$$\Sigma(\sigma^2, \phi, \tau^2) = \tau^2 \mathbf{I} + \sigma^2 \Sigma(\phi) \quad \text{数式 5.1-18}$$

ここで、 \mathbf{I} : サイズ n の単位行列

以上から \mathbf{Z} の尤度関数は

$$L(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu) = \frac{1}{2\pi^{n/2} |\Sigma(\sigma^2, \phi, \tau^2)|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma(\sigma^2, \phi, \tau^2)^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad \text{数式 5.1-19}$$

対数尤度関数は数式 5.1-20 のようになる。

$$L^*(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu) = \log L(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu) = -\frac{n}{2} \log(2\pi) - \frac{1}{2} \log |\Sigma(\sigma^2, \phi, \tau^2)| - \frac{1}{2} (\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{1})^T \Sigma^{-1}(\sigma^2, \phi, \tau^2) (\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{1}) \quad \text{数式 5.1-20}$$

最尤推定量は対数尤度関数を最大化するパラメータ $\widehat{\sigma^2}$, $\widehat{\phi}$, $\widehat{\tau^2}$, $\widehat{\mu}$ であり, \mathcal{C}_0 が微分可能であれば対数尤度方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial L^*(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu)}{\partial(\sigma^2)} &= 0 \\ \frac{\partial L^*(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu)}{\partial(\phi)} &= 0 \\ \frac{\partial L^*(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu)}{\partial(\tau^2)} &= 0 \\ \frac{\partial L^*(\sigma^2, \phi, \tau^2, \mu)}{\partial(\mu)} &= 0 \end{aligned} \quad \text{数式 5.1-21}$$

の解として得られる。簡単のため、変数の代わりに $\alpha = \sigma^2/\tau^2$ を用いれば対数尤度を表す数式 5.1-20 は数式 5.1-22 のようになる。

$$L^*(\alpha, \phi, \tau^2, \mu) = -\frac{n}{2} \log(2\pi) - \frac{n\tau^2}{2} - \frac{1}{2} \log |\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi)| - \frac{1}{2\tau^2} (\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{1})^T (\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} (\mathbf{Z} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{1}) \quad \text{数式 5.1-22}$$

二次元定常正規確率場の共分散関数が数式 5.1-16, 数式 5.1-17 の形式を持てば, データ $\mathbf{Z} = (Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n))^T$ に対するパラメータ σ^2 , ϕ , τ^2 , μ の最尤推定量 $\widehat{\sigma^2}$, $\widehat{\phi}$, $\widehat{\tau^2}$, $\widehat{\mu}$ は次のように求められる。まずパラメータ σ^2 を $\alpha = \sigma^2/\tau^2$ と置き換えると, $\widehat{\alpha}$, $\widehat{\phi}$ は数式 5.1-23 に示す連立方程式の解となる。

$$\tau^2(\alpha, \phi) \cdot \text{tr} \left[(\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} \Sigma(\phi) \right] = \mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu)^T \Sigma(\phi) \mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu) , \quad \text{数式 5.1-23}$$

$$\tau^2(\alpha, \phi) \cdot \text{tr} \left[(\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} \Sigma'(\phi) \right] = \alpha \mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu)^T \Sigma'(\phi) \mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu)$$

ここで,

$$\mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu) = (\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} (\mathbf{Z} - \mu \mathbf{1}) \quad \text{数式 5.1-24}$$

$$\mu(\alpha, \phi) = \frac{\mathbf{1}^T (\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} \mathbf{Z}}{\mathbf{1}^T (\mathbf{I} + \alpha \Sigma(\phi))^{-1} \mathbf{1}} \quad \text{数式 5.1-25}$$

$$\tau^2(\alpha, \phi) = \frac{1}{n} \mathbf{J}(\alpha, \phi, \mu)^T (\mathbf{Z} - \mu(\alpha, \phi) \mathbf{1}) \quad \text{数式 5.1-26}$$

と置き換えた。

そして、 $\hat{\mu}$ は数式 5.1-27 のように、 $\hat{\tau}^2$ は数式 5.1-28 のように求められる。

$$\hat{\mu} = \frac{\mathbf{1}^T (\mathbf{I} + \hat{\alpha} \Sigma(\hat{\phi}))^{-1} \mathbf{Z}}{\mathbf{1}^T (\mathbf{I} + \hat{\alpha} \Sigma(\hat{\phi}))^{-1} \mathbf{1}} \quad \text{数式 5.1-27}$$

$$\hat{\tau}^2 = \frac{1}{n} (\mathbf{Z} - \hat{\mu} \mathbf{1})^T (\mathbf{I} + \hat{\alpha} \Sigma(\hat{\phi}))^{-1} (\mathbf{Z} - \hat{\mu} \mathbf{1}) \quad \text{数式 5.1-28}$$

最後に、 $\hat{\sigma}^2$ は $\hat{\sigma}^2 = \hat{\alpha} \hat{\tau}^2$ より求められる。

5.1.1.3 予測地点における予測計算

選択されたバリオグラムモデルによる予測計算は、前工程で設定されたバリオグラムパラメータを用い、予測地点（通常はグリッド点）における予測値（バリオグラムモデルに基づく内挿値）を求める。手順は、①予測地点の設定、②予測計算の実行の順に実施する。

予測地点は任意の三次元座標系で設定した。ただし、予測地点の座標は当該要素の中心点の座標とした。

予測計算は、選択したクリギング法に従って予測地点の計算を行うものとする。クリギング法は、①単純型クリギング (simple kriging)、②通常型クリギング (ordinary kriging)、③普遍型クリギング (universal kriging) の3種類に分別できる。この3種類は、平均値の扱いが異なっている。

クリギングは、確率変数を求める方法であり、対象領域の位置ごとに、平均値、および分散値が決まっているとしている。単純型クリギングは、この平均値が全領域で共通（同じ値）であり、その値が既知であるとする。通常型クリギングは、全領域共通の平均値が未知であっても計算できる方法であり、一般的に多く使われる。一方、普遍型クリギングは、平均値

が位置により変わるものとし、平均値のトレンド（傾向面）を考慮する方法である。普遍型クリギングを行う場合、トレンドが計算されている標本データによるバリオグラムモデルを使用する。

本研究では、通常型クリギングを用い、トレンドが一定となるように設定した。図 5.1-5 にクリギングによる補間の概念を示す。

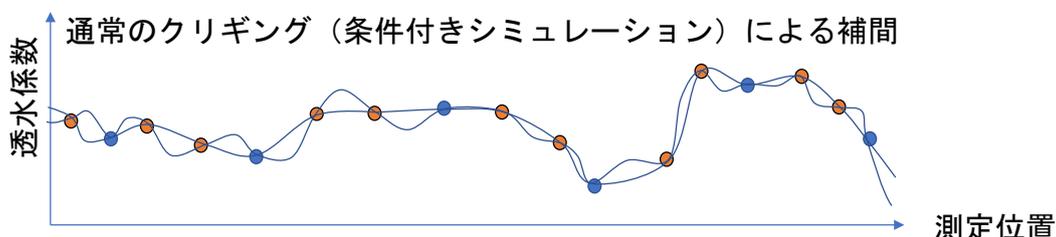


図 5.1-5 クリギングによる補間の概念図

バリオグラムモデルの選定とパラメータの設定がなされたら、クリギング法の選択を行い予測地点における予測値の計算を行う。この時、予測値が既知のデータの線形結合で記述できると考え、その重み係数を推定誤差分散が最小となるように定める。既知の点 x_α ($\alpha=1,2,\dots,n$) の確率場 $Z(x_\alpha)$ の線形結合により、未知の点 x での確率場の予測値 $Z^*(x)$ は数式 5.1-29 のように表される。

$$Z^*(x) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha Z(x_\alpha) \quad \text{数式 5.1-29}$$

ここで、 $Z^*(x)$: 未知の点 x での予測値、 x_α : 既知の点 ($\alpha=1,2,\dots,n$)、 $Z(x_\alpha)$: 既知の点 x_α ($\alpha=1,2,\dots,n$) の確率場、 w_α : 既知の点 x_α ($\alpha=1,2,\dots,n$) の重み係数

w_α は、数式 5.1-30 で表される連立方程式解くことで得られる。

$$\begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x_1) & \cdots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \cdots & \gamma(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(x_1 - x) \\ \vdots \\ \gamma(x_n - x) \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{数式 5.1-30}$$

ここで、 μ : ラグランジュの未定係数、 γ : バリオグラムの関数

バリオグラムの関数 γ は数式 5.1-31 で表される。

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad \text{数式 5.1-31}$$

ここで、 $\gamma(h)$: バリオグラム関数、 $C(h)$: 共分散関数 (= バリオグラムモデル)

$C(h)$ は、先述のバリオグラムモデルにあたる共分散関数で、モデルにより異なる関数式となっている²⁾。

数式 5.1-29～数式 5.1-31 によって測定点間の補間式 (n 次の多項式など) がバリオグラムモデルに従って設定され、測定点間の予測地点における予測値が計算される。測定点間の補完の概念を図 5.1-6 に示す。レンジが大きくなると、ある観測点 x_1 の測定値 $f(x_1)$ と同じような値となる範囲が広くなり、シルが大きくなると相関性が大きくなり曲線の凹凸が大きくなる。

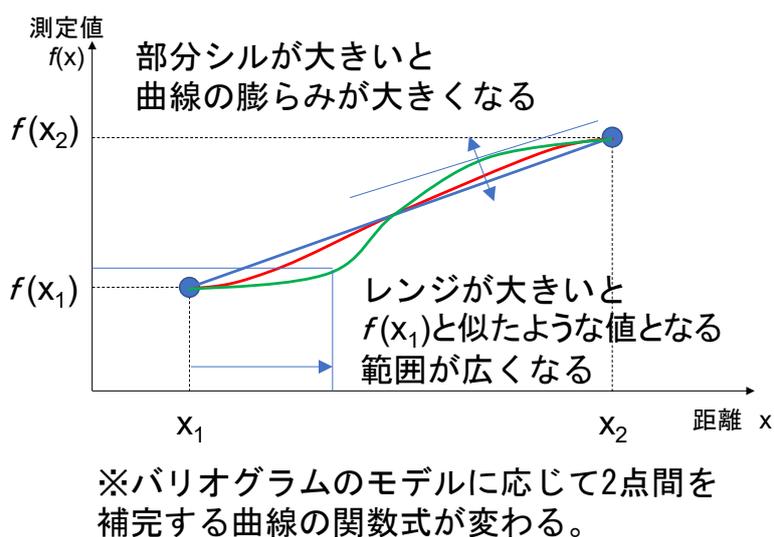


図 5.1-6 クリギング法における予測計算の概念図

5.1.1.4 条件付きシミュレーションの概要

条件付きシミュレーションは、クリギングによる予測値が不確実性を含む事を考慮し、確率的に起こりうる多数の予測値を乱数により発生させる方法で、本研究ではクリギング法による予測計算の結果を用いて条件付きシミュレーションを実行する。条件付きシミュレーションでは、オリジナルのクリギングにより推定される確率変数を $Z(\vec{x})$ とし、それとは別個の確率変数 $S(\vec{x})$ をシミュレーションにより、順次作成する。シミュレーションは、繰り返し実行され、前回の結果から、乱数により次の結果が作られる。

オリジナルのクリギング結果に対し、以下の式で新たな確率場の結果を付加し、条件付きシミュレーション結果とする。測定地点における値 $S(\vec{x}_i)$ は、オリジナルの実データ値である $Z(\vec{x}_i)$ と異なるが、数式 5.1-32 右辺の括弧内が測定地点ではゼロになる。そのため、条件付きシミュレーションでは、測定地点において実データ値 $Z(\vec{x}_i)$ と同じ値になる。

$$T_n(\vec{x}) = \hat{Z}(\vec{x}) + [S_n(\vec{x}) - \hat{S}_n(\vec{x})] \tag{数式 5.1-32}$$

ここで、

$\hat{Z}(\vec{x})$: 実データ値 $Z(x_i)$ を用いたクリギング予測結果

$S_n(\vec{x})$: $S(\vec{x})$ の n 回目シミュレーション結果

$\hat{S}_n(\vec{x})$: 測定地点における n 回目シミュレーション結果 $S_n(x_i)$ を用いたクリギング予測結果

$T_n(\vec{x})$: n 回目条件付きシミュレーション結果

5.1.2 三次元飽和定常浸透流解析の概要

マクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）により透水性を評価するための解析は、厚さ 2 m の難透水性覆土の処分ピットから外側の一方方向流れとなる動水勾配 0.1 を設定した三次元飽和定常浸透流解析とし、解析には Dtransu3D を使用した。Dtransu3D で用いられている基礎方程式は、密度依存を考慮した飽和・不飽和非定常浸透方程式を導き、オイラー法（有限要素法）による定式化を行うというものであり、数式 5.1-33 のように表される^{5), 6), 7), 8)}。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S_s + C_s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho K_{ij}^S K_r(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} + \rho K_{i3}^S K_r(\theta) \rho_r \right\} \quad \text{数式 5.1-33}$$

($i, j = 1, 2, 3$)

ここで、

φ : 圧力水頭, θ : 体積含水率, S_s : 比貯留係数, $C_s(\theta)$: 比水分容量, K_{ij}^S : 飽和透水テンソル, $K_r(\theta)$: 比透水係数, c : 濃度 ($0 \leq c \leq 1$, 飽和濃度を 1 として正規化), $\beta = 1$: 飽和領域, $=0$: 不飽和領域, γ : 溶質の密度比

密度依存を考慮した移流分散解析では、濃度変化によって密度が変化する。すなわち、数式 5.1-33 の左辺第 1 項の c と左辺第 2 項の ρ の値が変化し密度流が生じるため、数式 5.1-33 と移流分散方程式を 2 段階に連成させて解析を行う必要がある。一方、濃度変化による密度変化が生じないとすると、浸透と移流分散は別々の問題として取り扱うことができ、数式 5.1-33 により、定常もしくは非定常浸透解析を行い、流速分布、体積含水率分布を求め、この値を用いて移流分散解析のみを実施することができる。本研究では、溶質を含む流体を取り扱わないことより、移流分散解析は実施しない。

マクロ透水係数は三次元飽和定常浸透流解析の結果より得られる領域から流出する断面流量から算出した。本研究の解析対象の空間の寸法は 3 章で示した施工試験後の土構造物体に等しく、 $2\text{m} \times 10\text{m} \times 0.45\text{m}$ とした。数式 5.1-34 にマクロ透水係数の算出式を、図 5.1-7 に本研究でのマクロ透水係数の算出方法の概念図を示す。

$$k = \frac{Q}{Ai} \quad \text{数式 5.1-34}$$

ここで、

k : マクロ透水係数(m/s), Q : 断面流量(m³/s), A : 断面積(m²), i : 動水勾配 (0.1 とした)

また、核種漏洩抑制の観点から、数式 5.1-35 に示す浸透流解析の結果より得られた流れ場を用いた粒子追跡法⁹⁾により上流側の断面に 1000 粒子配置し、締め固めたベントナイト混合土中の通過時間を算定し、後述の様々な条件による施工後の構造物全体の性能評価に与える影響についても整理した。図 5.1-8 に粒子追跡法による計算結果を図示した例を示す。

$$X_{p,i}(t + \Delta t) = X_{p,i}(t) + v_i (\overline{X_p}(t)) \Delta t, \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{数式 5.1-35}$$

ここで、

$X_{p,i}(t)$: 時刻 t の粒子位置の i 成分, v_i : 実流速成分, $\overline{X_p}(t)$: 粒子位置ベクトル, Δt : 時間増分

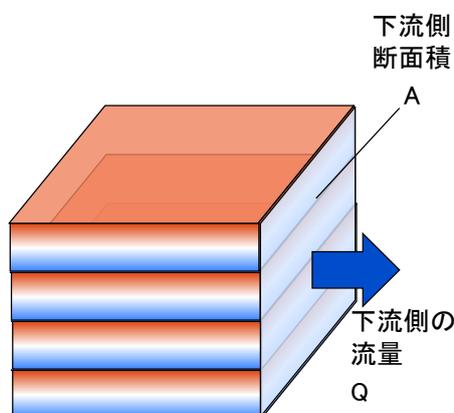


図 5.1-7 本研究でのマクロ透水係数の算出方法の概念図

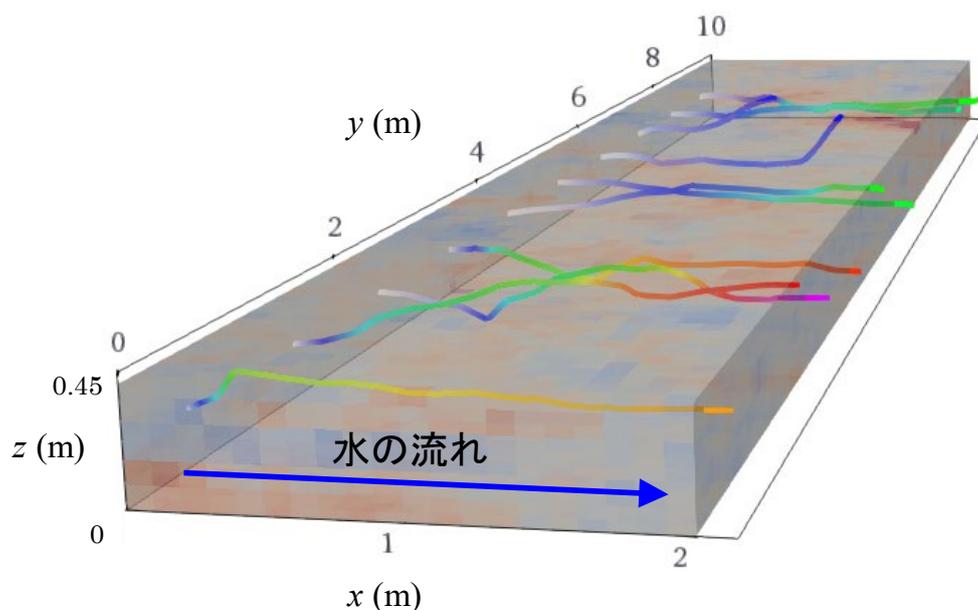


図 5.1-8 粒子追跡法による計算結果の例

5.2 施工試験後の土構造物の透水性能の評価

5.2.1 クリギングによる三次元モデル空間の構築

5.2.1.1 標本バリオグラムの算定と理論バリオグラムへのフィッティング

第3章で採取した乾燥密度のデータ（コアカッター法および3D スキャナのデータを用いた方法）を第4章で示した代替指標により透水係数に換算した。透水係数は対数表記とし、平均値・標準偏差等の計算も、対数表記とした値の対数平均値・対数標準偏差の値を用いた。

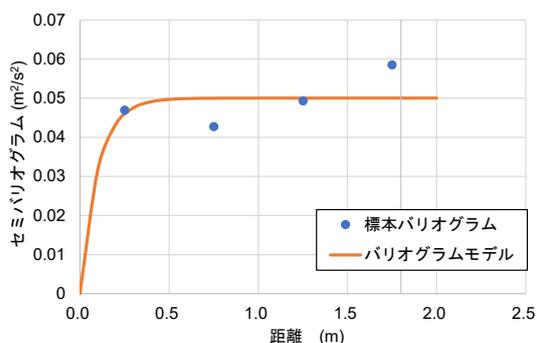
図 5.2-1, 図 5.2-2 に、換算した透水係数に関する標本バリオグラムと理論バリオグラムの選定結果、バリオグラムに用いるパラメータ（シル・レンジ）の抽出を行った結果の例を示す。バリオグラムの作成は、通常水平方向ベクトルあるいは三次元空間上のベクトルの2点間の特性値の差から求められるが、本研究では1方向に転圧を行ったことより、同じ水平方向でも転圧ローラの進行方向と横断方向の間では相関長＝レンジの値が異なると考えた。これは、図 5.2-3 ちょうどそば打ちの時の材料を薄く広げる時のように、材料が転圧ローラの進行方向には引き延ばされ、横断方向にはローラが押しつけた分だけ材料が横断方向に移動することが考えられたからである。そのため、図 5.2-4, 図 5.2-5 に示すように、x方向の場合、A列ならばA列に並ぶ測定点同士で、y方向の場合、例えば距離2mで横断方向に並ぶ3点同士で標本バリオグラムを計算することとした。

鉛直方向のバリオグラムの計算は、施工層が異なれば使われる材料も、敷き均し時や転圧時のばらつきも互いに無関係であるので、互いに無相関であるとした。2章で示したように、同じ層内の密度分布に関する既往研究の測定例^{10), 11), 12)}では、敷き均し厚さ150mm～250mmで施工し、転圧後の厚さ75mm～120mmのコアを回収し、厚さ方向に2～3分割し

て層内の乾燥密度分布を測定している。その結果、上下方向の乾燥密度の比率は下側を 100 とすると 104.2~128.8 : 100 であり、転圧ローラの接地圧が小さいほど、また層厚が大きくなるほど同一層内の密度差が大きくなる傾向となっている。そのため、深度方向の密度分布を評価することとした。

本研究では、締め固めた後にブロックサンプリングを行い、パラフィン法を適用して層内の乾燥密度分布を測定した。回収したブロックは図 5.2-6 に示すように左右半分に分割し、半分はそのまま 1 層分の乾燥密度を測定し、残りの半分をさらに下半分と上半分に分割した。この時、均等に上下に 2 分割できなかつたため、下半分を削り落として上半分のみ乾燥密度を測定した。削り落とした下半分の乾燥密度は、左右分割した元のブロックで測定した 1 層分の乾燥密度と上半分の乾燥密度の測定結果より計算で求めた。測定結果を図 5.2-7 に示す。約 50mm の層厚内でも密度分布が認められたが、上半と下半の比率は 101~102 : 100 であり、上半は下半の 1~2% 程度しか大きくないことが分かった。

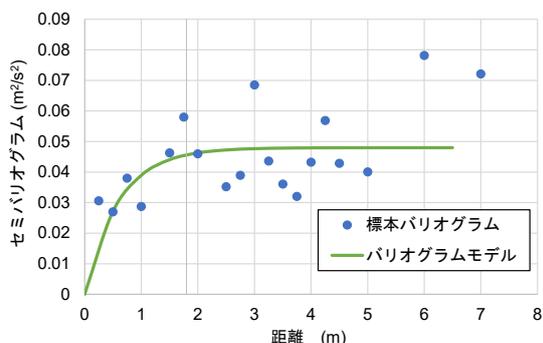
結果として、転圧ローラの進行方向である y 方向の方が横断方向である x 方向よりもレンジが長くなっており、2 点間の相関の影響範囲が長くなっていることがわかる。また、鉛直方向は同一層内の乾燥密度分布を考慮しようとしたが、同一層内の上下の乾燥密度の比率が 101~102 : 100 とほぼ同程度とみなせるので層内一定値とした。



X 方向 ; 横断方向

シル : 0.05, レンジ : 0.42m

図 5.2-1 x 方向のバリオグラムの例



Y 方向 ; 進行方向

シル : 0.048, レンジ : 1.8m

図 5.2-2 y 方向のバリオグラムの例



図 5.2-3 転圧ローラによる材料移動の概念図

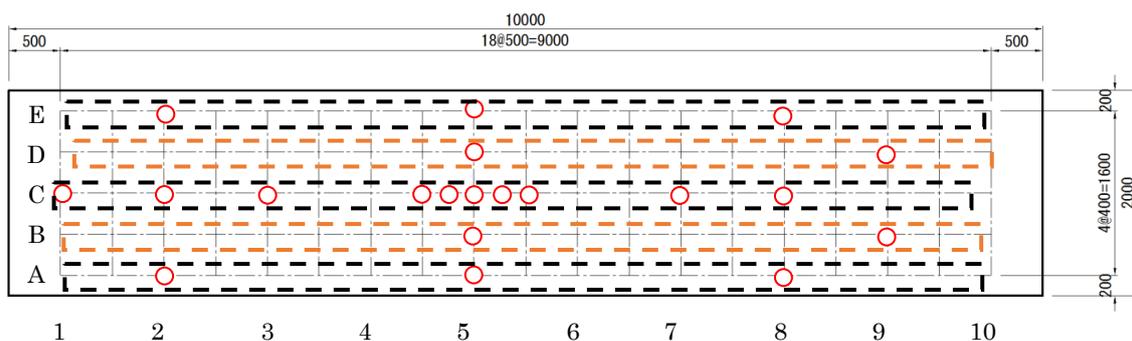


図 5.2-4 x 方向の 2 点間抽出時の組み合わせ

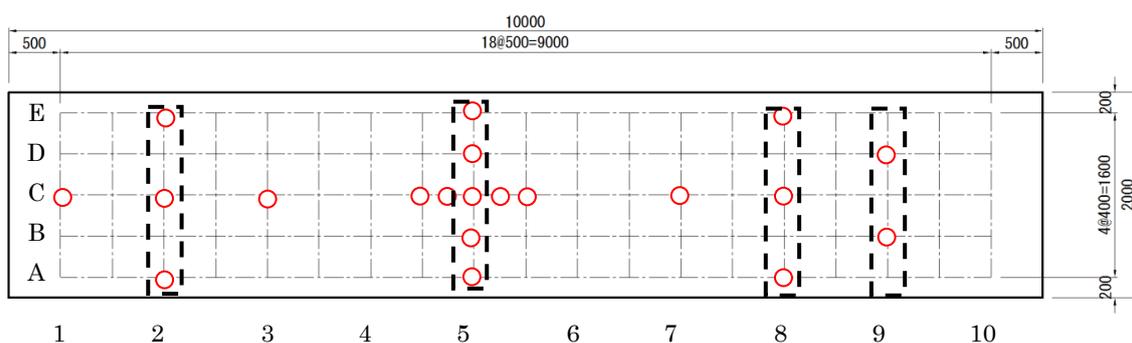


図 5.2-5 y 方向の 2 点間抽出時の組み合わせ

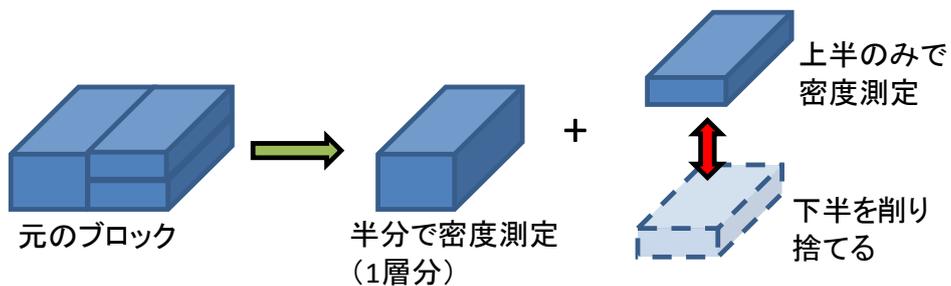


図 5.2-6 ブロックサンプリング後のパラフィン法適用ブロックの概念図

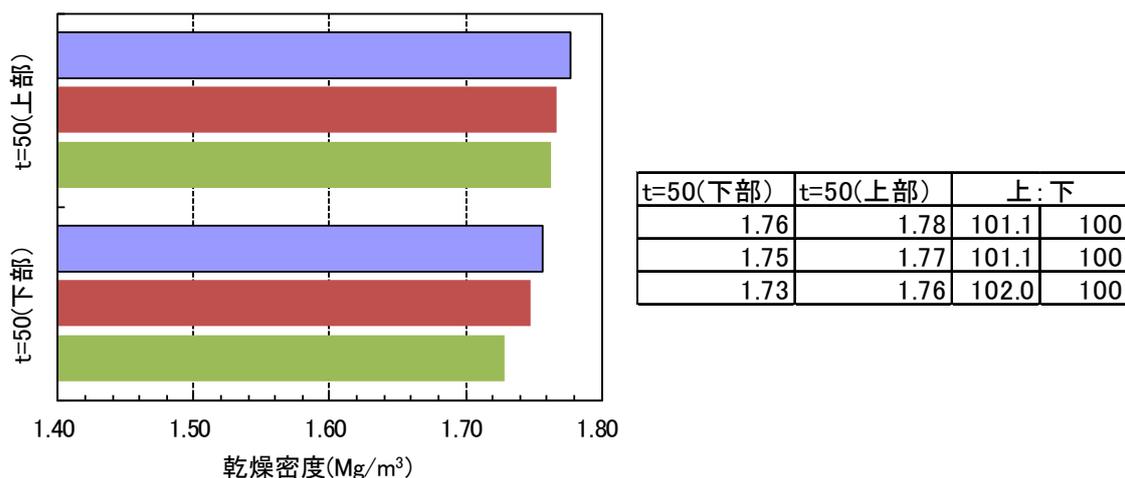


図 5.2-7 層厚 50 mm のブロックを用いたパラフィン法の測定結果 (上下密度差)

5.2.1.2 クリギングと条件付きシミュレーションの実行結果

理論バリオグラムより抽出したシルとレンジを用いてクリギングと条件付きシミュレーションを実行した。入力データは施工試験で測定した乾燥密度から換算した透水係数と測定位置の三次元座標、換算した透水係数の分散が入力データとなる。

表 5.2-1 に実施した解析ケース名と入力パラメータの一覧表を示す。Case1-1 と Case1-2 はそれぞれ乾燥密度の測定方法が異なる。

図 5.2-8 にコアカッター法で測定した乾燥密度より換算した透水係数のヒストグラムを解析条件の入力条件の一例として示す。透水係数は対数表記したものである。このデータを入力値としてクリギングと条件付きシミュレーションを実施した結果の例を図 5.2-9 および図 5.2-10 に示す。クリギングは $2\text{m} \times 10\text{m} \times 0.45\text{m}$ の三次元空間を平面方向 (x, y 方向) には $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ 、厚さ方向 (z 方向) には転圧後の層厚である 0.045m の要素の大きさで実施した。条件付きシミュレーションの試行回数は 100 回を 1 セットとした。そのため、予測値の数は 1 層当たり 2,000 点、1 回の試行回数あたり 20,000 点、100 回の試行回数で 2,000,000 点となる。透水係数のヒストグラムは入力値のものよりも出力値の方がより正規分布に近い形状となることがわかる。また、クリギングによる予測も、測定値に近い箇所は測定値の影響を受け、隣り合った箇所連続して値が変化していることを確認できた。

さらに、全測定点 N から 1 つの測定点を取り除いた残りの測定点でクリギングを行い、取り除いた測定点 i の予測値 P_i を計算し、予測値の精度を確認した。これを各測定点 ($i = 1 \sim N$) について実施し、測定点 i における測定値 O_i と予測値 P_i の誤差を求めた。各測定点の差を合計して平均すると、数式 5.2-1 に示すような平均二乗交差検証予測誤差 MSE が計算できる。 MSE が小さいほど、クリギングによる予測精度が高いといえる。この方法を本研究ではクロスバリデーションと呼称することとする。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \quad \text{数式 5.2-1}$$

1 層目の乾燥密度に対するクリギングのクロスバリデーションの結果は $MSE = 0.0599$ であった。これは対数表示した透水係数の測定値と予測値の差が平均で 0.24 m/s 程度であることを示す。 MSE は残差の二乗和なので分散と同じ次元を持つので、これをクリギングによるばらつきとみなして三次元飽和定常浸透流解析に対してどの程度の影響をもつのかを評価することとした。評価結果は後述する。

図 5.2-9 に示したような三次元モデル空間を用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施した。次節でその結果について示す。

表 5.2-1 解析ケースと入力値一覧表（基本ケース）

ケース名	条件	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case1-1	コアカッター法の乾燥密度より透水係数を換算	0.0640	0.05	0.42	1.8
Case1-2	3D スキャナによる方法の乾燥密度より透水係数を換算	0.1634	0.00008	0.30	1.8

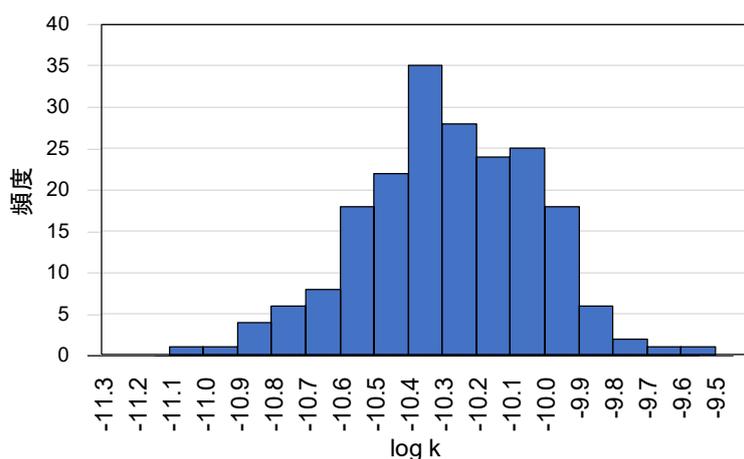


図 5.2-8 透水係数のヒストグラム（入力値）

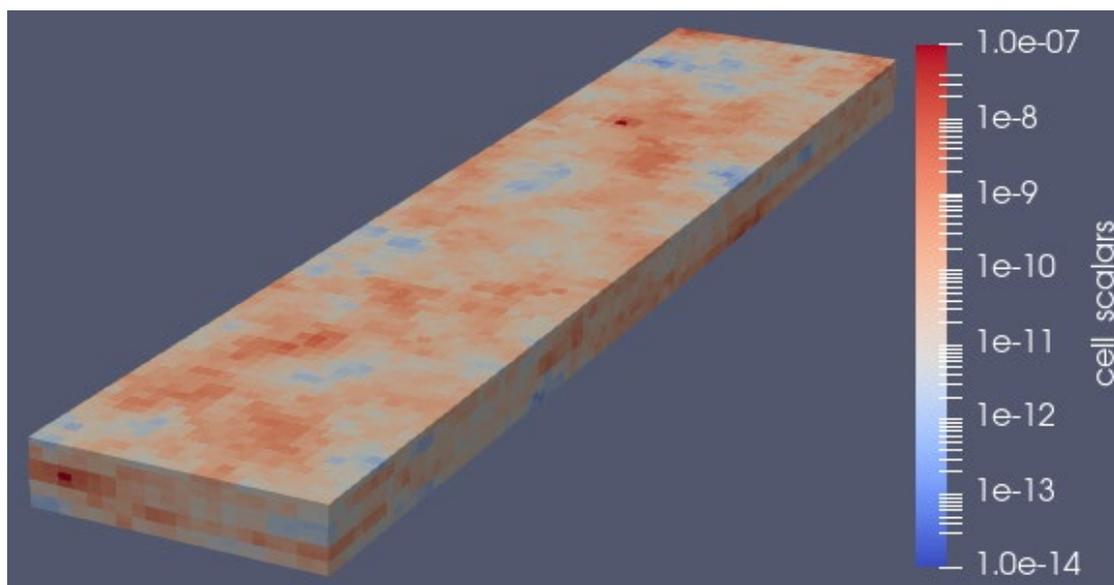


図 5.2-9 透水係数の三次元空間分布の例

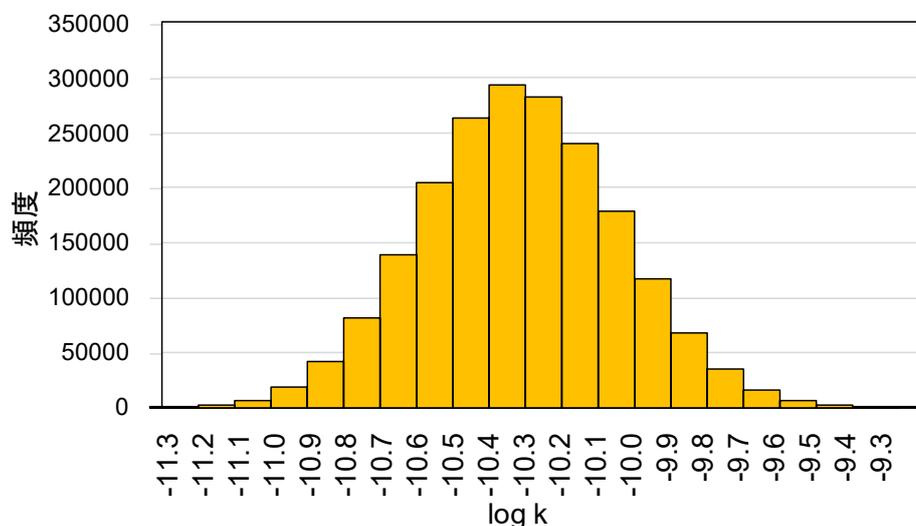


図 5.2-10 透水係数のヒストグラム (出力値)

5.2.2 三次元飽和定常浸透流解析の結果

Case1-1を対象に,条件付きシミュレーションと三次元飽和定常浸透流解析の試行回数などの程度で収束するのを確認した.横軸に試行回数,縦軸にマクロ透水係数の平均値の推移およびマクロ透水係数の標準偏差の推移との関係をそれぞれ図 5.2-11 および図 5.2-12 に示す.平均値および標準偏差の推移とは,例えば,試行回数 50 回終了時点においては,マクロ透水係数 50 個分の平均値と標準偏差を計算した値ということである.試行回数の増加に伴い収束していくのが確認できた.また,概ね 100 回程度で収束していることを確認できたので,すべての解析ケースでの試行回数を 100 回にすることとした.

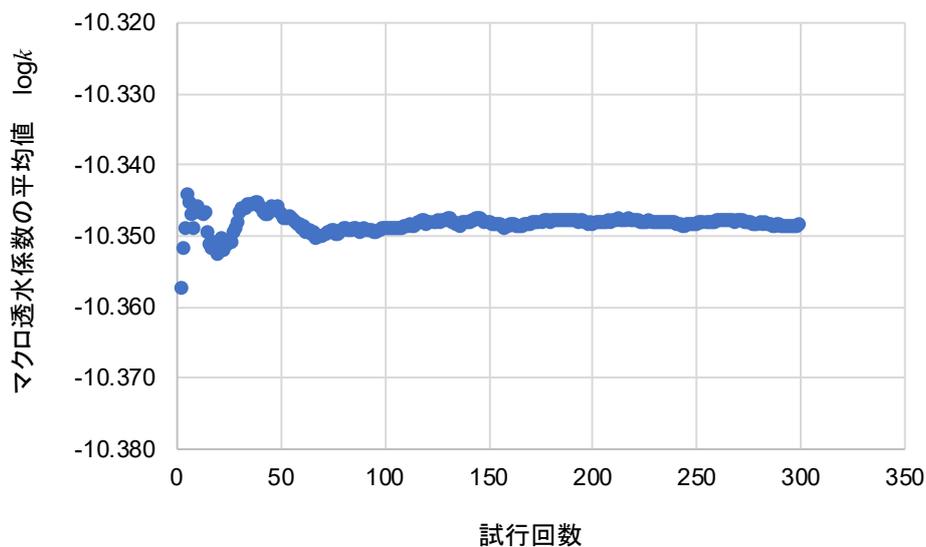


図 5.2-11 マクロ透水係数の平均値の試行回数による推移

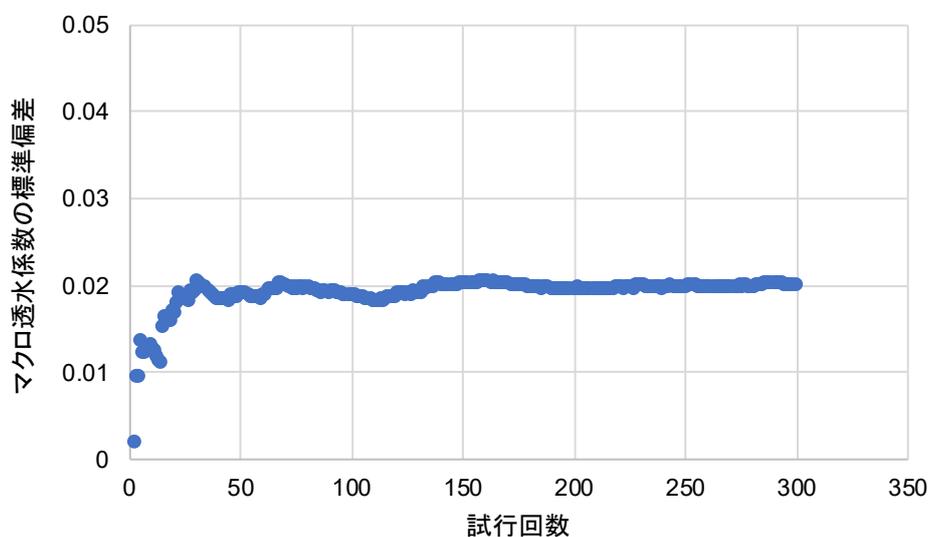


図 5.2-12 マクロ透水係数の標準偏差の試行回数による推移

次に、三次元飽和定常浸透流解析の結果より断面流量 Q を算出し数式 5.1-34 を用いてマクロ透水係数を求めた。その結果を図 5.2-13, 図 5.2-14 に示す。Case1-1, Case1-2 の各ケースのマクロ透水係数は 1.0×10^{-10} m/s を超過することは無かった。これは、要求される透水性能を満足する結果である。また、Case1-1, Case1-2 とも、x 軸方向（横断方向）と y 軸方向（長手方向）の流れのマクロ透水係数は x 軸方向の流れのマクロ透水係数が若干高くなるがほぼ同じような値となり、z 軸方向（鉛直方向）の流れの順にマクロ透水係数が小さくなる結果となった。これは、モデルの違法性に依存するためであり、x 軸方向の相関性

よりも y 軸方向の相関性の方が強いモデルの影響を受けていると考えられる。すなわち、モデルの各要素に与えられた透水係数はレンジに応じて似たような値が連なっていることが考えられる。x 軸方向におけるレンジ (0.42m) に対するモデルの幅 (2m) の比が、y 軸方向におけるレンジ (1.8m) に対するモデルの延長 (10m) との比より小さい。そのため、透水係数が大きい要素が連なる確率は、x 軸方向の水の流れの方が y 軸方向よりも相対的に高い状況になっていると考えられる。

z 軸方向の流れに対しては、まったくのランダムな流れ場であるため、図 5.2-10 に示したモデルの要素に与えられた透水係数の平均値に近い値となったと考えられる。

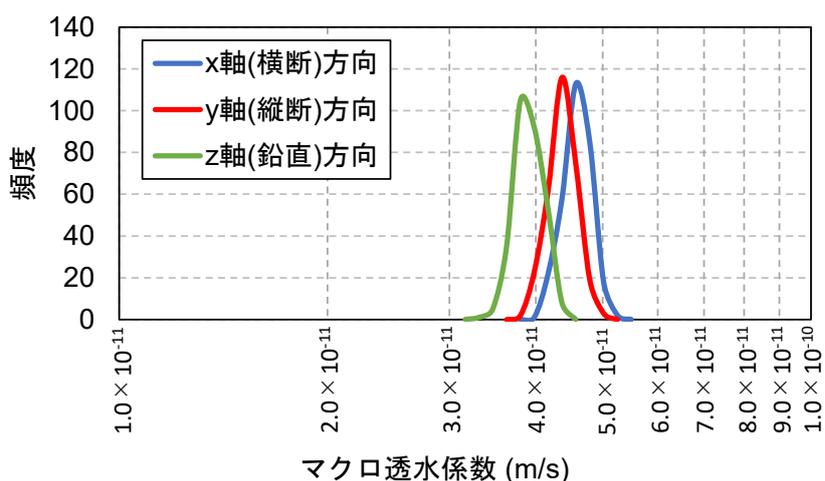


図 5.2-13 三軸方向のマクロ透水係数 (Case1-1)

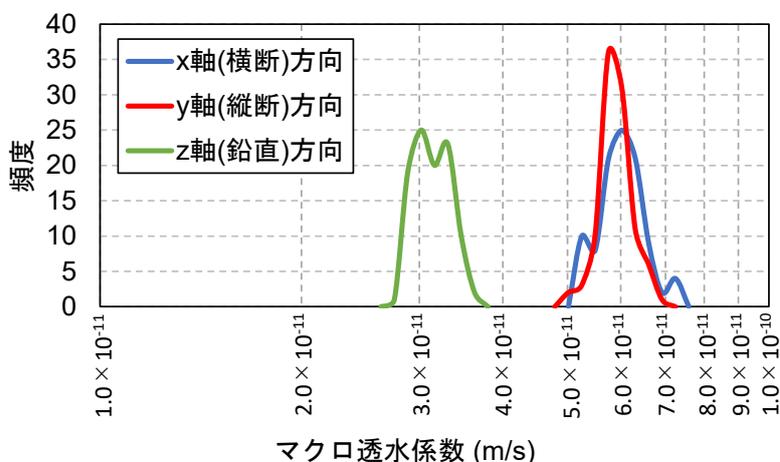


図 5.2-14 三軸方向のマクロ透水係数 (Case1-2)

Case1-1, Case1-2 を比較した結果の箱ひげ図を図 5.2-15～図 5.2-17 に示す。箱ひげ図は中央値を 50%とし、50%±25%を箱で、最小値と最大値をひげで示している。箱の部分が

厚ければそれだけ中央値から離れた範囲にデータが分布する。すなわち、ばらつきが大きいことを示している。ひげ部分が長ければそれだけ最大値・最小値が中央値より離れており、これもばらつきが大きいことを示す。

コアカッター法よりも 3D スキャナによる方法の方が測定した乾燥密度の分布幅が大きく、計算の入力値となる分散も大きくなる。そのため Case1-1 と Case1-2 を比較するとマクロ透水係数の分布幅も大きくなったと考えられる。

低透水層を通過し、コンクリートピットへ浸入する水の流れを想定し、粒子追跡法により幅 2m を横断するときの到達時間を整理した。管理型処分施設における管理期間は 300 年程度を予定されているので、この期間中に到達する確率が高いことは望ましくない。図 5.2-18、図 5.2-19 に繰り返し回数 100 回試行後の平均値と最小値の箱ひげ図を示す。到達時間の平均値に関しては、Case1-1、Case1-2 の 2 つのケースでは 2000 年～5500 年程度であった。想定される管理期間が 300 年なので、平均値に関しては十分に低透水性が発揮される結果となった。到達時間の最小値に関しては Case1-2 で 312 年が最小値となった。Case1-1、Case1-2 の 2 つのケースでは、300 年程度で到達するケースは見られなかった。

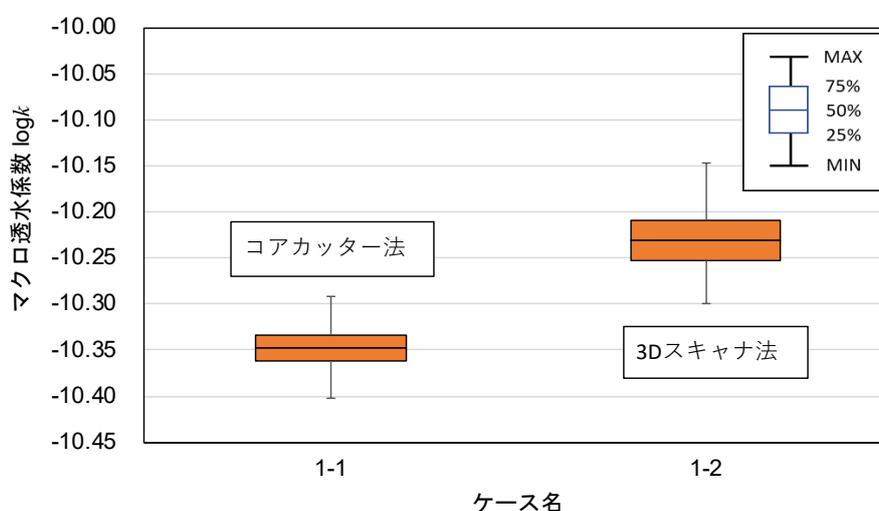


図 5.2-15 マクロ透水係数の計算結果 (Case1-1, Case1-2, x 軸方向流れ)

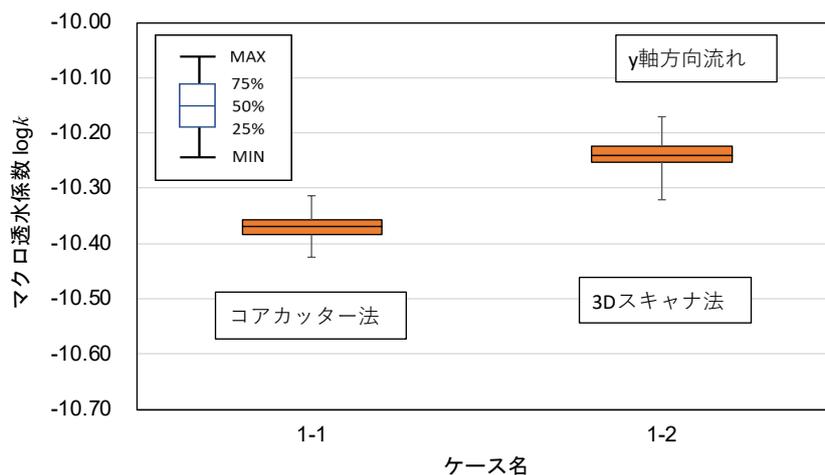


図 5.2-16 マクロ透水係数の計算結果 (Case1-1, Case1-2, y 軸方向流れ)

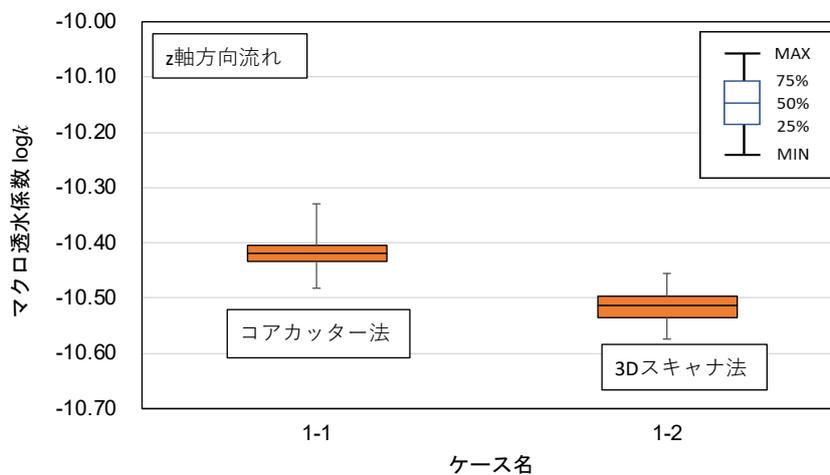


図 5.2-17 マクロ透水係数の計算結果 (Case1-1, Case1-2, z 軸方向流れ)

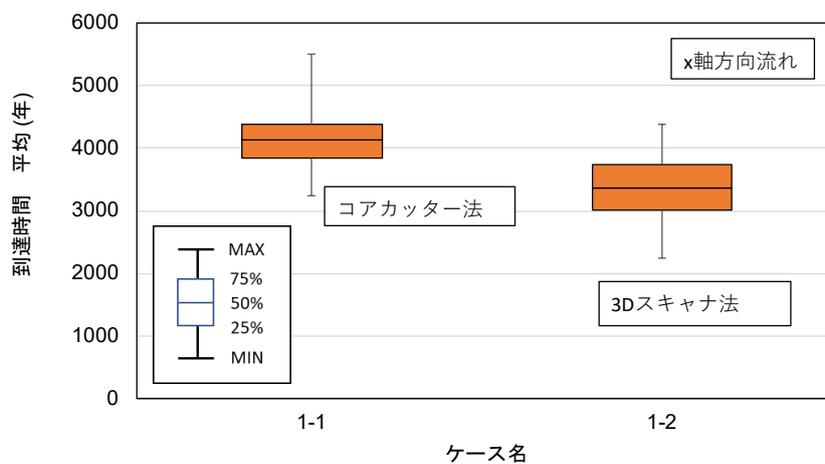


図 5.2-18 到達時間 (平均値) (Case1-1, Case1-2, x 軸方向流れ)

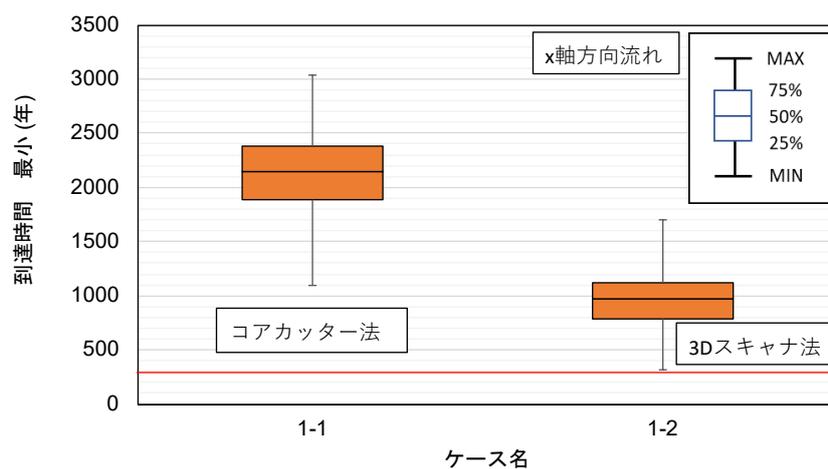


図 5.2-19 到達時間 (最小値) (Case1-1, Case1-2, x 軸方向流れ)

5.2.3 計算過程における各段階でのばらつき等の影響評価

ここで、浸透流解析に用いる三次元透水係数分布モデルを構築する過程で生じるばらつき等を見積もり、最終的に算出したマクロ透水係数への影響の程度を検証する。

図 5.2-20 に三次元透水係数分布モデルを構築する過程の各段階で生じるばらつき等を分散として計算した結果を示す。コアカッター法による現場密度試験の結果は施工に起因するばらつきやコアカッター法の測定誤差を含んだ形で測定値として取得され、サンプル数に応じた分散（測定値）を持つ。

次に 4 章で紹介した代替指標と透水係数の相関関係より現場密度試験の結果は透水係数へ換算される。この時、測定値の分散が反映されるとともに代替指標と透水係数の相関式のもつ推定精度が高くなれば透水係数の換算値の尤度が高くなる。本研究では、透水係数の推定値の尤度をばらつきとみなすこととする。透水係数の推定値のばらつきは、図 5.2-21 に示すように代替指標と透水係数の相関式の 95%信頼区間の上限と下限の式、および中央値の換算式から算出した透水係数の分散として求めた。

地球統計学的手法を用いた処理において「5.2.1.2 クリギングと条件付きシミュレーションの実行結果」で紹介したクロスバリデーションの結果を参照する。 $MSE = 0.0599$ であり、この値を分散とみなすこととする。

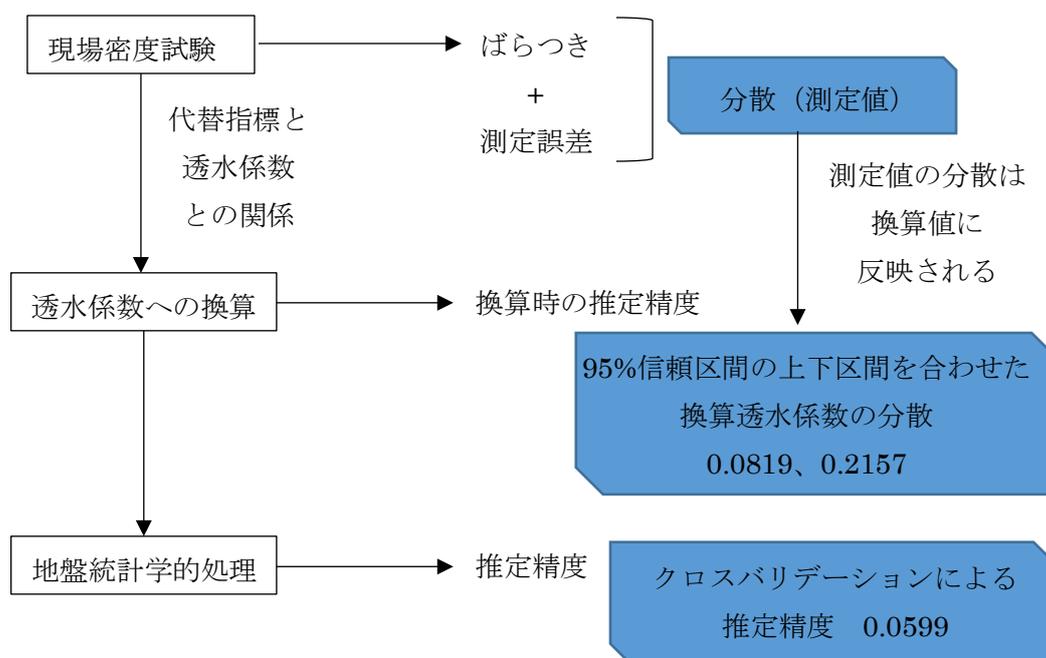


図 5.2-20 各段階で発生するばらつき等の要因

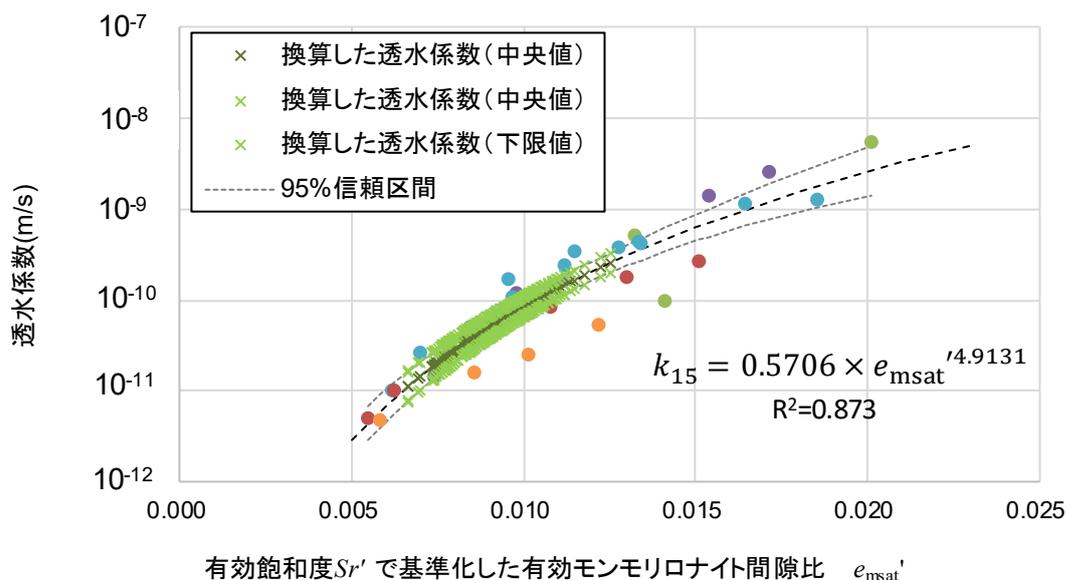


図 5.2-21 ばらつき評価に用いた透水係数の推定値

表 5.2-2 にばらつきの影響評価のための解析ケースに用いた入力パラメータを示す。分散は図 5.2-20 で示した値の合計値を分散とみなして用いることとする。それ以外は表 5.2-1 に示した基本ケースと同じ条件とした。

表 5.2-2 解析ケースと入力値一覧表 (ばらつき影響評価)

ケース名	条件	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case1-1_2	Case1-1 にばらつき等の分 を分散に加算	0.1417	0.05	0.42	1.80
Case1-2_2	Case1-2 にばらつき等の分 を分散に加算	0.2757	0.00008	0.30	1.80

図 5.2-22 に Case1-1 と Case1-1_2 の条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布の比較結果を、と図 5.2-24 に Case1-2 と Case1-2_2 の条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布の比較結果をそれぞれ示す。これらの比較結果は分散の値を大きくした方がヒストグラムのピークの高さが低くなり裾が広がる傾向を示しているが、その変化量は大きくないことを示している。

これらの頻度分布を持つモデルを用いて浸透流解析を行った。図 5.2-23 に Case1-1 と Case1-1_2 の三軸方向のマクロ透水係数の比較結果を、図 5.2-25 に Case1-2 と Case1-2_2 の三軸方向のマクロ透水係数の比較結果をそれぞれ示す。分散の値が大きくなればマクロ透水係数が大きくなる傾向が見られるが、その影響の度合いは桁が異なる程度には大

きくない。マクロ透水係数を対数透水係数で比較した場合、最大値で1%弱大きく見積もることがわかった。本研究では、マクロ透水係数の計算結果に対し、この程度の推定誤差を有したものとみなして議論することとする。

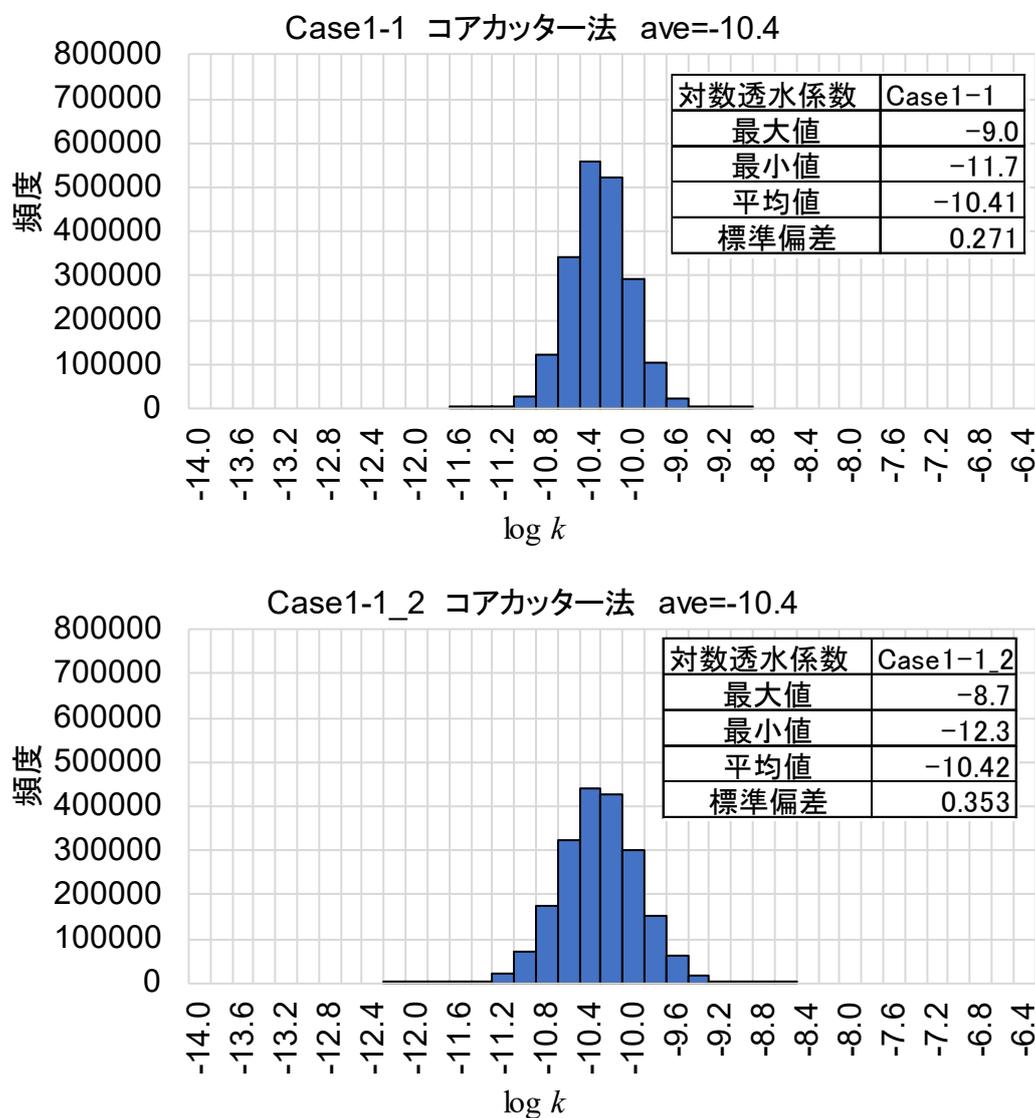
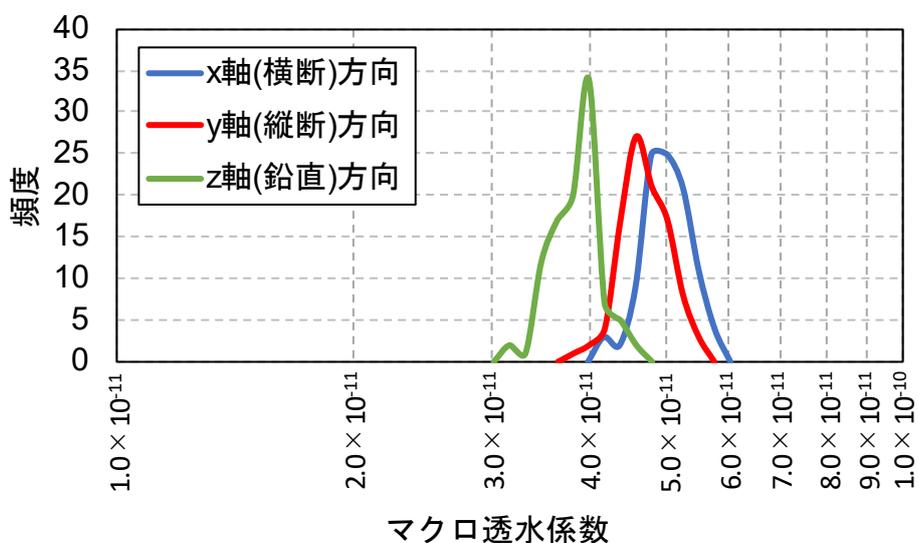
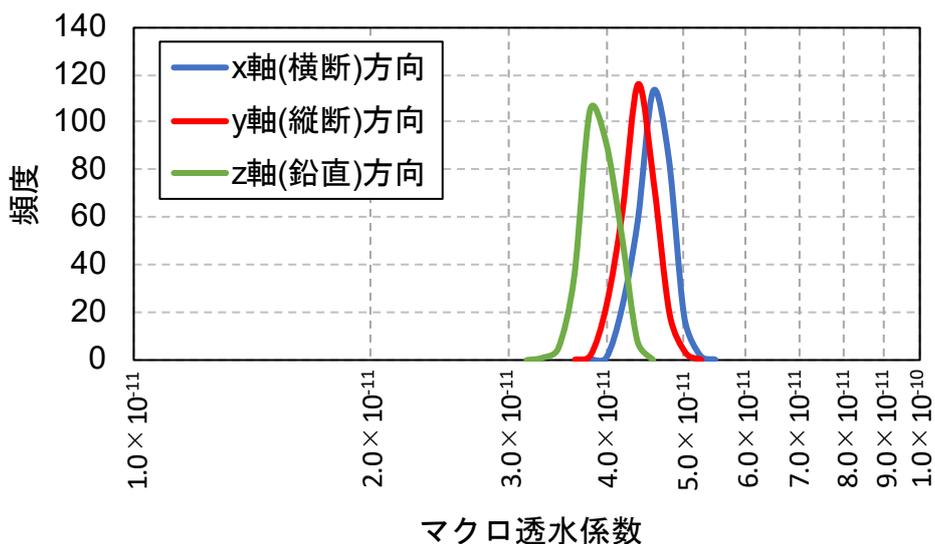


図 5.2-22 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布の比較 (Case1-1 と Case1-1_2)



統計値	対数透水係数			対数透水係数		
	Case1-1			Case1-1_2		
	X軸	Y軸	Z軸	X軸	Y軸	Z軸
平均値	-10.348	-10.370	-10.418	-10.311	-10.339	-10.426
中央値	-10.348	-10.370	-10.419	-10.312	-10.341	-10.422
標準偏差	0.020	0.021	0.021	0.030	0.030	0.030
変動係数	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003
最大値	-10.292	-10.313	-10.373	-10.244	-10.276	-10.356
最小値	-10.402	-10.426	-10.481	-10.396	-10.426	-10.511
幅	0.111	0.113	0.108	0.152	0.150	0.155
標本数	300	300	300	100	100	100

図 5.2-23 三軸方向のマクロ透水係数の比較 (Case1-1 と Case1-1_2)

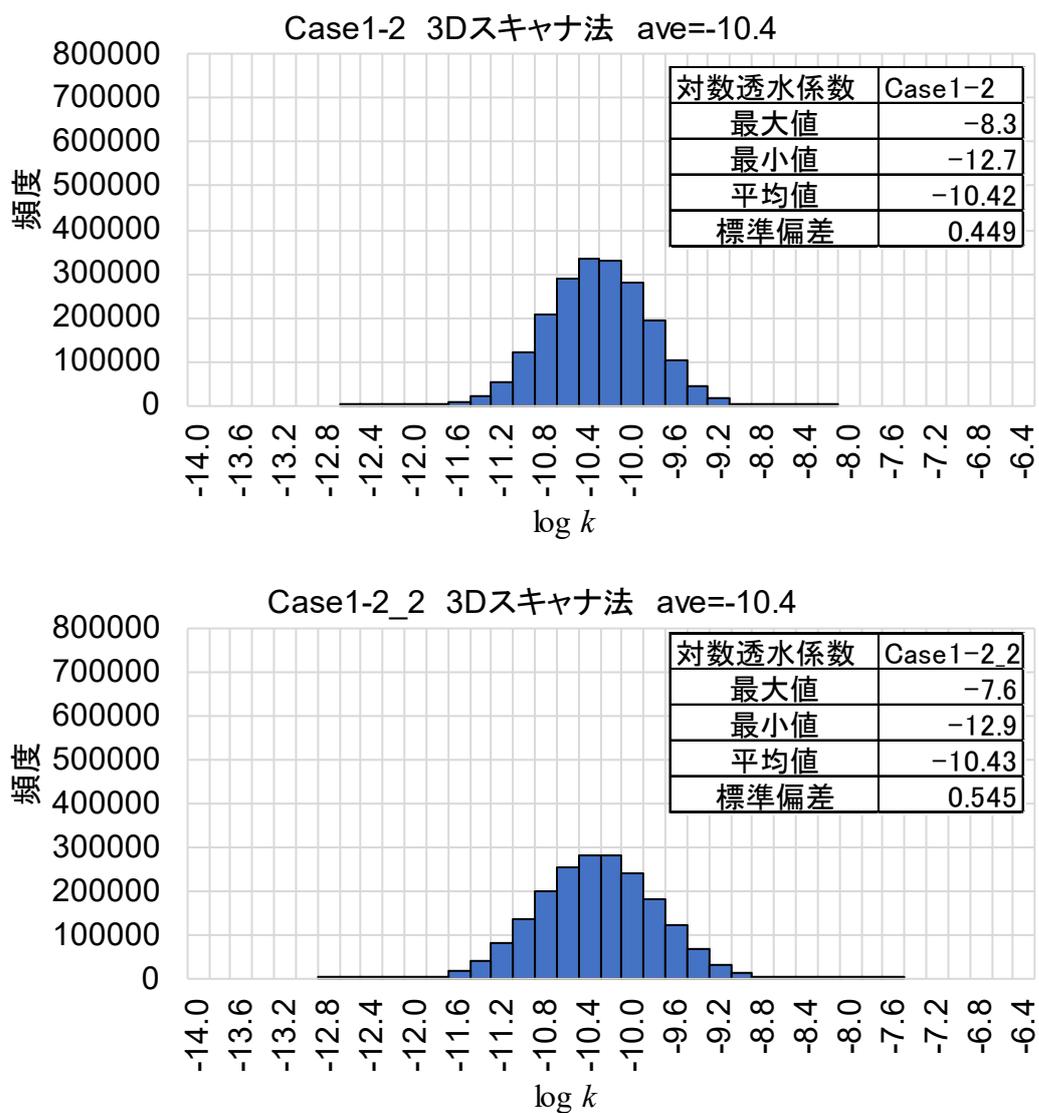
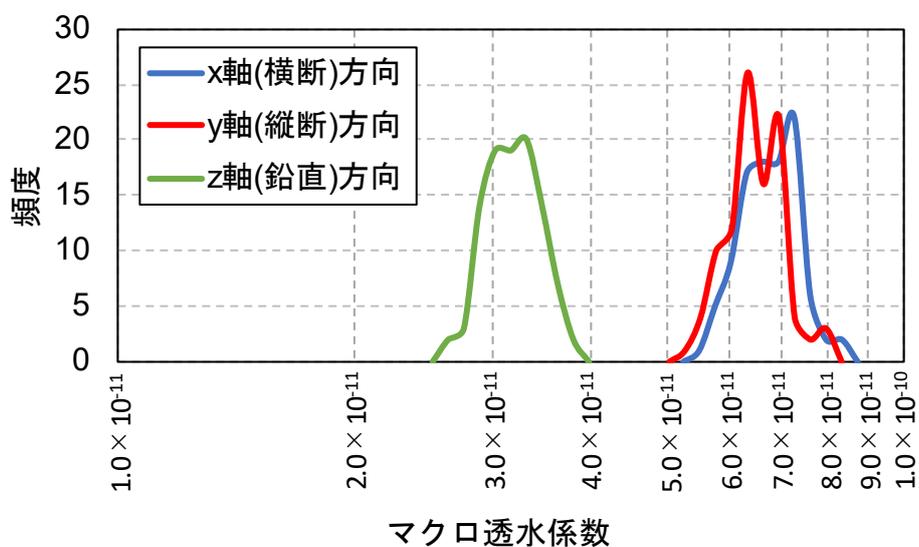
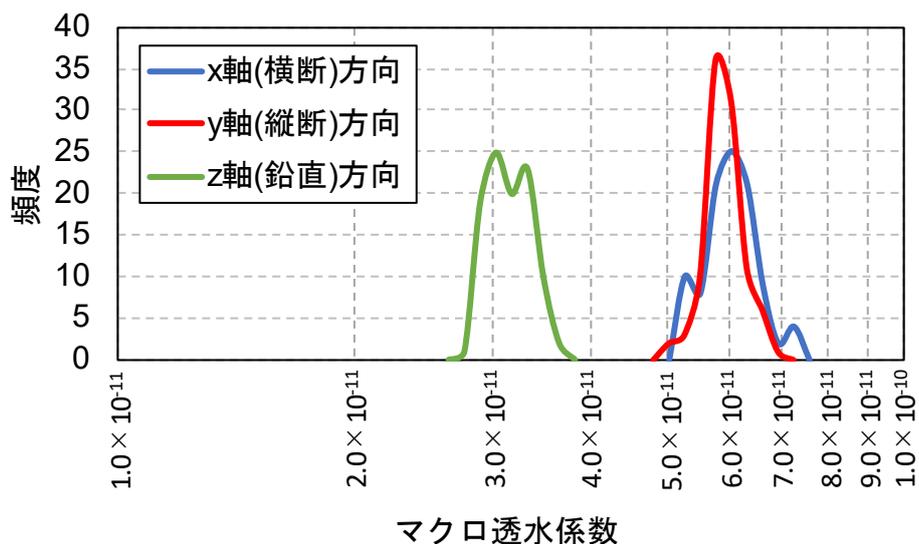


図 5.2-24 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布の比較 (Case1-2 と Case1-2_2)



統計値	対数透水係数			対数透水係数		
	Case1-2			Case1-2_2		
	X軸	Y軸	Z軸	X軸	Y軸	Z軸
平均値	-10.232	-10.239	-10.514	-10.180	-10.201	-10.506
中央値	-10.231	-10.241	-10.514	-10.181	-10.202	-10.506
標準偏差	0.034	0.024	0.027	0.038	0.035	0.034
変動係数	-0.003	-0.002	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003
最大値	-10.147	-10.171	-10.455	-10.066	-10.105	-10.414
最小値	-10.299	-10.306	-10.573	-10.272	-10.283	-10.589
幅	0.152	0.134	0.118	0.205	0.177	0.175
標本数	100	100	100	100	100	100

図 5.2-25 三軸方向のマクロ透水係数の比較 (Case1-2 と Case1-2_2)

5.3 解析手法による施工のばらつきの許容範囲の評価

5.3.1 解析目的と解析条件

図 5.3-1 に示すように、施工時の目標値を下回る箇所が出た場合、その発生頻度がどの程度までなら許容できるのかを評価する。入力値のデータセットは、施工試験で取得したデータにばらつきの範囲を大きくするなどの操作を行い、仮想的なデータセットを作成して行う。表 5.3-1 に解析ケースと条件の一覧表を示す。

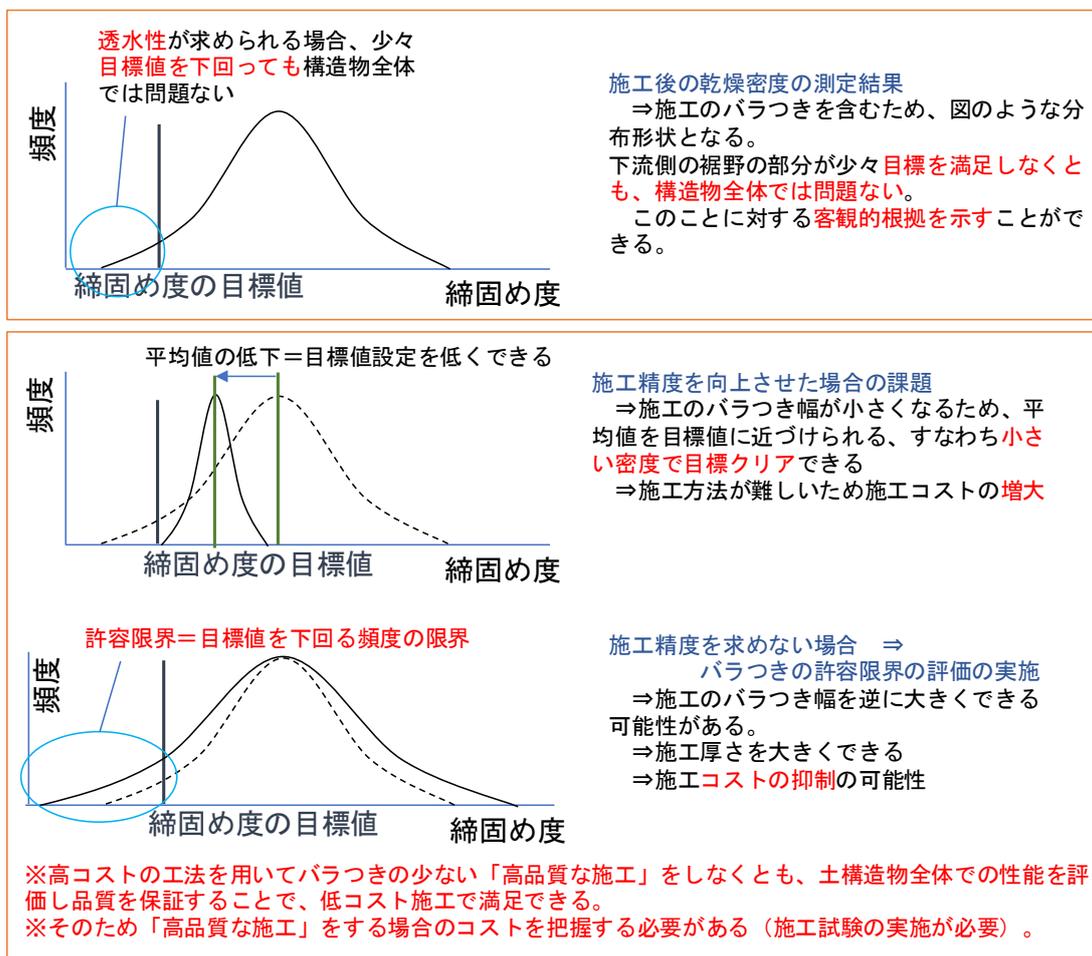


図 5.3-1 施工時の目標値の設定に関する概念図（図 1.2.2 の再掲）

表 5.3-1 解析ケースと入力値一覧表（ばらつき許容範囲検討）

ケース名	条件	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case2-1	Case1-1 の標準偏差を 2 倍	0.2846	0.05	1.8	0.42
Case2-2	Case1-1 の標準偏差を 2.5 倍	0.4447	0.05	1.8	0.42
Case2-3	Case1-1 の標準偏差を 3 倍	0.6404	0.05	1.8	0.42
Case2-4	Case1-2 の標準偏差を 1.5 倍	0.4384	0.0008	1.8	0.42
Case2-5	Case1-2 の標準偏差を 2 倍	0.7658	0.0008	1.8	0.30
Case2-6	平均値・標準偏差を操作	0.0994	0.05	1.8	0.30

Case1-1 や Case1-2 で用いていたデータは、測定した乾燥密度等から透水係数を換算し、換算後の透水係数の平均値・標準偏差を入力値とした本ケースでは、Case1-1 や Case1-2 と同じ平均値で異なる標準偏差を持つデータセットを構築することとした。データセットの構築には、表計算プログラム（Microsoft 社；EXCEL を使用）の機能のうち、正規分布の積分関数の逆関数の機能（EXCEL の関数のうち NORMINV）を活用した。これは、乾燥密度の分布が正規分布を呈すると仮定して、各測定点に対する乾燥密度を割り当てるというものである。この表計算プログラムの正規分布の積分関数の逆関数の機能の入力値は 0～1 までの任意の値、平均値、標準偏差である。このうち、0～1 までの任意の値は乱数を発生させて入力値とした。平均値は Case1-1 や Case1-2 と同じ値、標準偏差は Case1-1 や Case1-2 の値を所定の倍数を乗じたものを使用した。ただし、表 5.3-1 に示した Case2-6 のみ、後述の理由で対数透水係数の平均値と標準偏差を調整して使用した。

発生させた乾燥密度を各測定点に割り当てて仮想的なモデルを作成し、このモデルを測定値としてクリギングと条件付きシミュレーションを行った。条件付きシミュレーションの試行回数は 100 回とした。条件付きシミュレーションを 100 回試行した後の結果を入力値として三次元飽和定常浸透流解析を実施した。

5.3.2 解析結果

5.3.2.1 マクロ透水係数および到達時間の結果

Case2-1～Case2-5 までの 3 軸方向流れにおけるマクロ透水係数の結果を図 5.3-2～図 5.3-6 に示す。いずれのケースでも Case1-1 や Case1-2 のように、x 軸方向流れと y 軸方向流れが同程度であり、若干 y 軸方向のマクロ透水係数が小さくなった。z 軸方向流れのマクロ透水係数が小さくなる傾向が見られた。また、入力値のばらつきが大きくなるとマクロ透水係数の分布幅も大きくなる傾向となった。

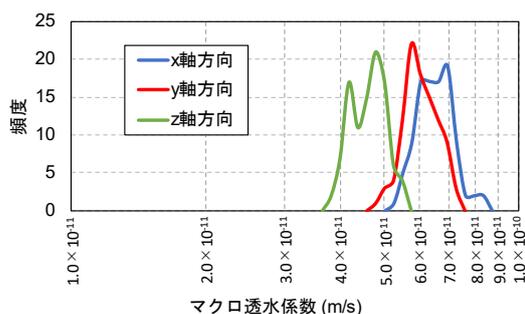


図 5.3-2 三軸方向のマクロ透水係数 (Case2-1)

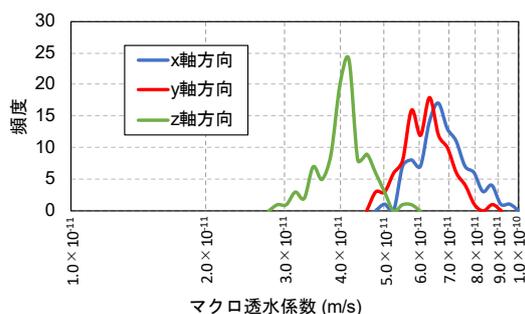


図 5.3-3 三軸方向のマクロ透水係数 (Case2-2)

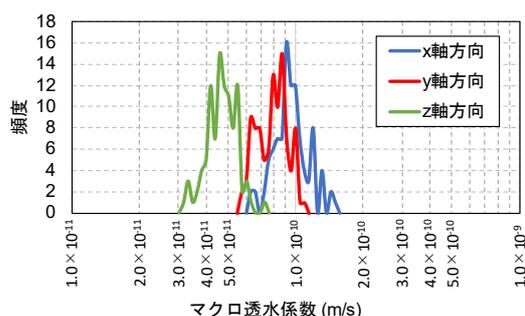


図 5.3-4 三軸方向のマクロ透水係数 (Case2-3)

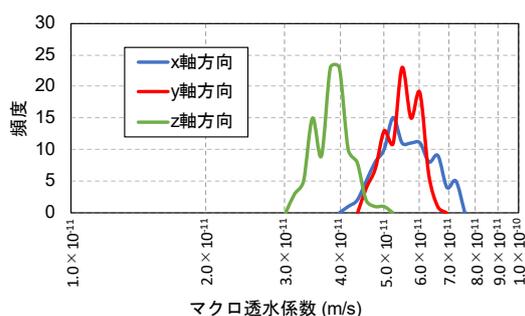


図 5.3-5 三軸方向のマクロ透水係数 (Case2-4)

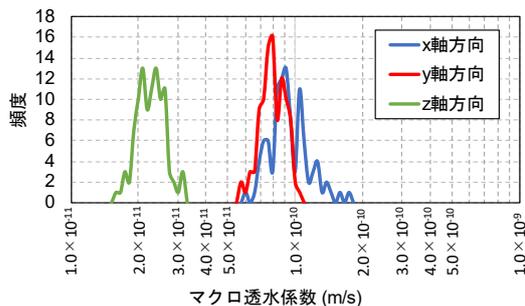


図 5.3-6 三軸方向のマクロ透水係数 (Case2-5)

Case2-1～Case2-5 までのマクロ透水係数の比較結果を図 5.3-7～図 5.3-9 に示す。入力値の透水係数の標準偏差，すなわち空間に分布している透水係数のばらつきが大きくなれば，マクロ透水係数の平均値やばらつきも大きくなる傾向がみられた。これは，入力値の透水係数の分布幅が大きくなることで，解析領域内の $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を上回る要素の存在確立が高くなった影響と考えられる。標準偏差を 3 倍にした Case2-3，標準偏差を 2 倍にした Case2-5 では，マクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を上回る場合も発生しているため，要求性

能を満たしているとは言えない。

Case2-1～Case2-5 までの粒子追跡法による到達時間の最小値の計算結果を図 5.3-10 に示す。入力値の透水係数のばらつきの影響で到達時間の最小値のばらつきも大きくなっている。また、到達時間の最小値に関しては、Case2-3, Case2-5 で300年を下回った。このように最小値が300年を下回るケースはマクロ透水係数も $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を上回る可能性があるケースでもあるので、要素内の透水係数の分布幅の影響 ($1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を上回る要素の存在確立が高くなった影響) が出ていると考えられる。

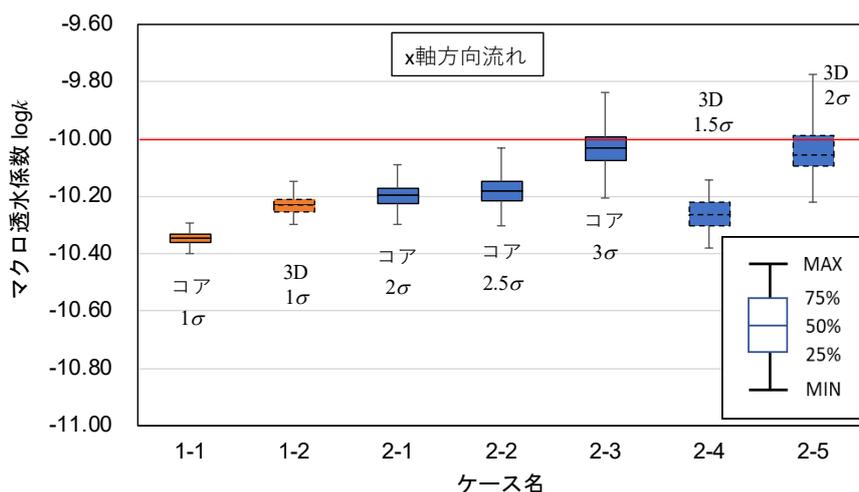


図 5.3-7 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-1～2-5, x 軸方向流れ)

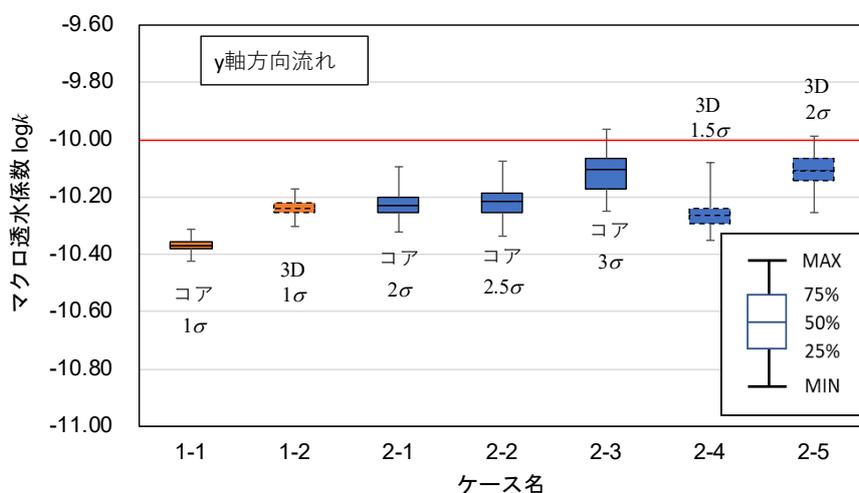


図 5.3-8 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-1～2-5, y 軸方向流れ)

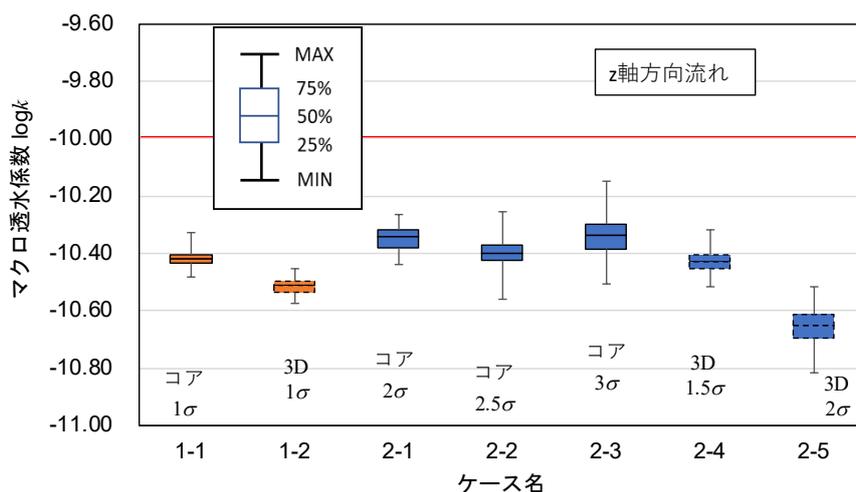


図 5.3-9 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-1~2-5, z 軸方向流れ)

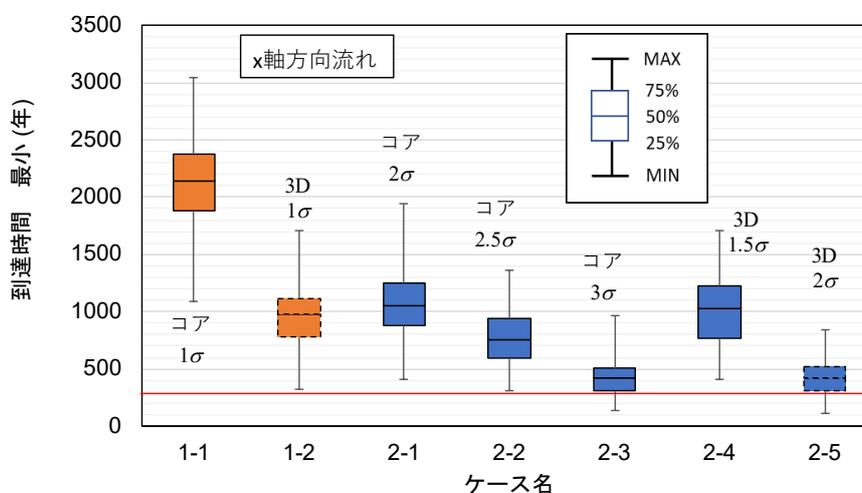


図 5.3-10 到達時間 (最小値) (Case2-1~2-5, x 軸方向流れ)

5.3.2.2 要求性能を満足する条件の抽出

(1)不良率の定義と整理結果

ここで、Case1-1, Case1-2, Case2-1~Case2-5 条件付きシミュレーションを 100 回試行した後のモデル空間内の透水係数の頻度分布をヒストグラムでまとめた結果を図 5.3-11 ~図 5.3-17 に示す。本節で示した解析ケース Case1-1, Case1-2, Case2-1~Case2-5 のクリギングおよび条件付きシミュレーションへの入力値としての透水係数の平均値は 4.2×10^{-11} (対数表示で-10.41) として同じ値を用いている。各ケースで主に変更した点は、標準偏差を基準としたばらつきの度合いである。これは、基本ケースである Case1-1 および Case1-2 の標準偏差を数倍に変更して用いている。目標値としての透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ であるので、この値を上回る頻度は標準偏差の値を大きくすると多くなる。この目標

値を上回る割合を不良率として図中に示した. 図 5.3-7 に示したように, マクロ透水係数の計算結果が 1.0×10^{-10} m/s を超過する場合が発生するケース (Case2-3, Case2-5) の不良率は 24% を超過しているのがわかる.

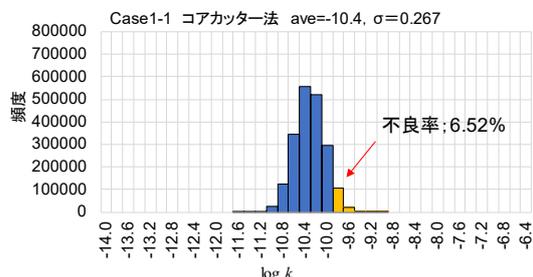


図 5.3-11 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case1-1)

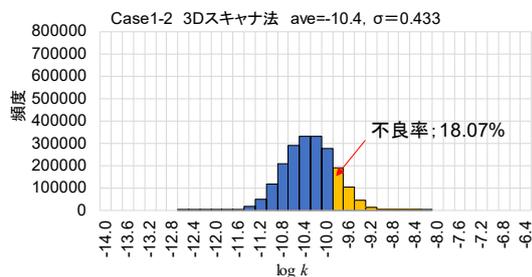


図 5.3-12 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case1-2)

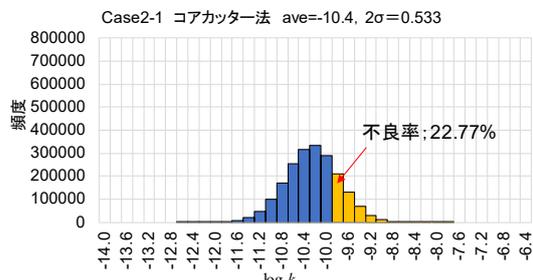


図 5.3-13 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case2-1)

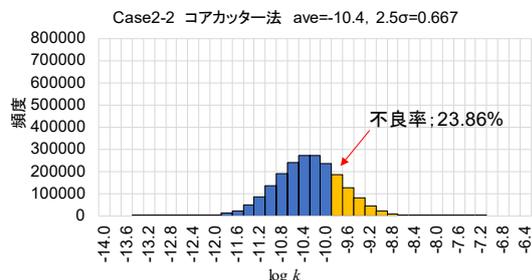


図 5.3-14 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case2-2)

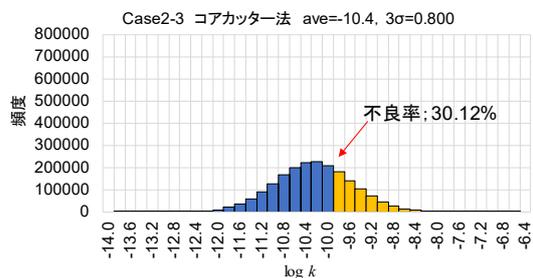


図 5.3-15 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Cas2-3)

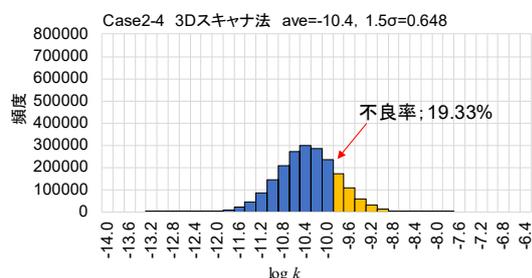


図 5.3-16 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case2-4)

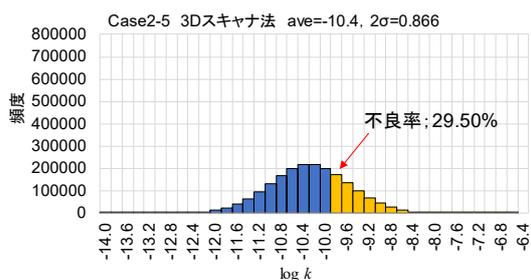


図 5.3-17 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case2-5)

(2) 平均値・目標値・標準偏差の関係をを用いた要求性能を満足する条件の抽出

不良率と透水係数の平均値、および目標値の関係を図 5.3-18 に示すように標準偏差を用いて表すこととした。

表 5.3-2 に透水係数の平均値・目標値・標準偏差の関係を示す。表中の標準偏差は図 5.3-18 の σ_a や σ_b に、「 $\log k = -10\text{m/s}$ と平均値の差」は $n \times \sigma_a$ や $m \times \sigma_b$ に、「 $\log k = -10\text{m/s}$ 時の倍数」は n や m にそれぞれ相当する。不良率が高くなると $\log k = -10\text{m/s}$ 時の倍数は小さくなる傾向となる。不良率が高いケースはばらつきが大きく標準偏差の値も高くなるので、正規分布のすそが広がる。そのため、対数透水係数の平均値と目標値との値の差は相対的に小さくなることを示す。対数透水係数の平均値と目標値の距離を標準偏差に対する倍数で表すことによって、不良率の許容範囲が明らかになると考えた。対数透水係数の平均値が $\log k = -10.4 \text{ m/s}$ 程度の場合、不良率の許容範囲は 24%程度未満であり、この時の対数透水係数の平均値と目標値の距離は、標準偏差に対する倍数で表すと 0.70 倍程度であった。

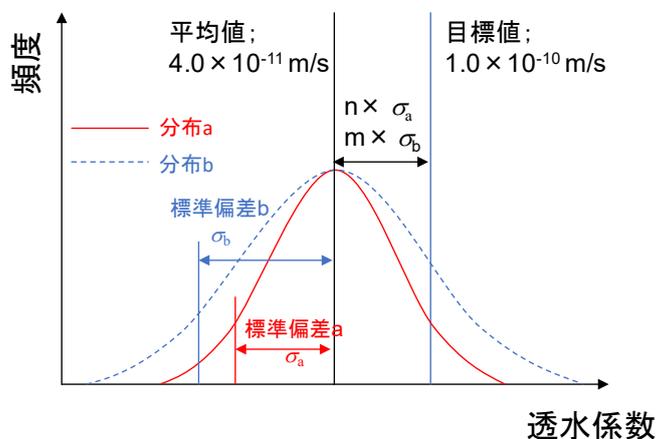


図 5.3-18 透水係数の平均値・目標値・標準偏差の関係の模式図

表 5.3-2 透水係数の平均値・目標値・標準偏差の関係

ケース名	対数透水係数				logk= -10m/s と平均値の差	logk= -10 m/s 時の倍数	不良 率 (%)
	最大 値	最小 値	平均 値	標準偏差			
Case1-1	-9.0	-11.7	-10.4	0.271	0.415	1.53	6.5
Case1-2	-8.3	-12.7	-10.4	0.449	0.400	0.89	18.1
Case2-1	-7.8	-12.7	-10.4	0.480	0.356	0.74	22.8
Case2-2	-7.2	-13.6	-10.4	0.589	0.412	0.70	23.9
Case2-3	-6.7	-14.0	-10.4	0.712	0.364	0.51	30.1
Case2-4	-7.8	-13.3	-10.5	0.539	0.460	0.85	19.3
Case2-5	-6.8	-14.2	-10.4	0.735	0.388	0.53	29.5
Case2-6	-8.8	-11.2	-10.2	0.299	0.206	0.69	24.1

5.3.2.3 平均値・目標値・標準偏差の関係を用いた条件表記法の検証

例えば、対数透水係数の平均値を表 5.3-2 に示した Case2-6 のように $\log k = -10.2$ m/s 程度に小さくした場合を考慮する。不良率の許容範囲は小さくなるが、対数透水係数の平均値と目標値の相対的な距離、すなわち対数透水係数の平均値と目標値の距離を標準偏差に対する倍数は対数透水係数の平均値が $\log k = -10.4$ m/s 程度の場合と同様に 0.70 倍程度になることが考えられる。

以上の仮定を検証するための解析を表 5.3-1、表 5.3-2 に示した Case2-6 のように実施した。三次元飽和定常浸透流解析の入力値として使用した条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布を図 5.3-19 に示す。また、計算結果のうち、三軸方向のマクロ透水係数の結果を図 5.3-20 に、Case1-1、Case1-2 および Case2-1~Case2-3 のマクロ透水係数との比較結果を図 5.3-21~図 5.3-23 に、粒子追跡法による到達時間の最小値を図 5.3-24 に示す。平均値を $\log k = -10.2$ m/s 程度に小さくしても、対数透水係数の平均値と目標値の差を標準偏差に対する倍数が 0.70 倍とすれば、マクロ透水係数は要求性能を満たすことを確認できた。また、到達時間も最小で 900 年を超えることを確認できた。すなわち、低透水性という機能を十分に発揮できていることを確認できた。

これらの結果より、本研究での解析条件であれば、対数透水係数の平均値と目標値との差を 0.70σ (Case2-6 では 0.69 でも要求性能を満足することが確認できたが、0.69 よりも若干ではあるが安全側となること、端数をなくすことでわかりやすくすることより、本研究では 0.70 とした) とすれば、求められる機能としての低透水性を発揮できることが分かった。さらに一般的に適用できる知見として、対数透水係数の平均値と目標値の差を標準偏差に対する倍数 $n \times \sigma$ として管理することで、施工時の管理目標としての分布幅（いわゆる上げ越し量）の設定が可能となるといえる。また、対数透水係数の平均値が当初計画よりも小さい場合でも、対数透水係数の平均値と目標値の差 $n \times \sigma$ を確認することで、要求性能を満足

しているかの確認ができるといえる。さらに、施工に起因するばらつきが対数透水性係数の標準偏差 σ として表現できる場合、対数透水性係数の目標値に対数透水性係数の平均値と目標値の差として $n \times \sigma$ を加えた対数透水性係数の平均値を施工目標値として設定することが可能となる。図 5.3-25 に対数透水性係数の平均値と目標値との差の標準偏差による品質管理の概念を示す。

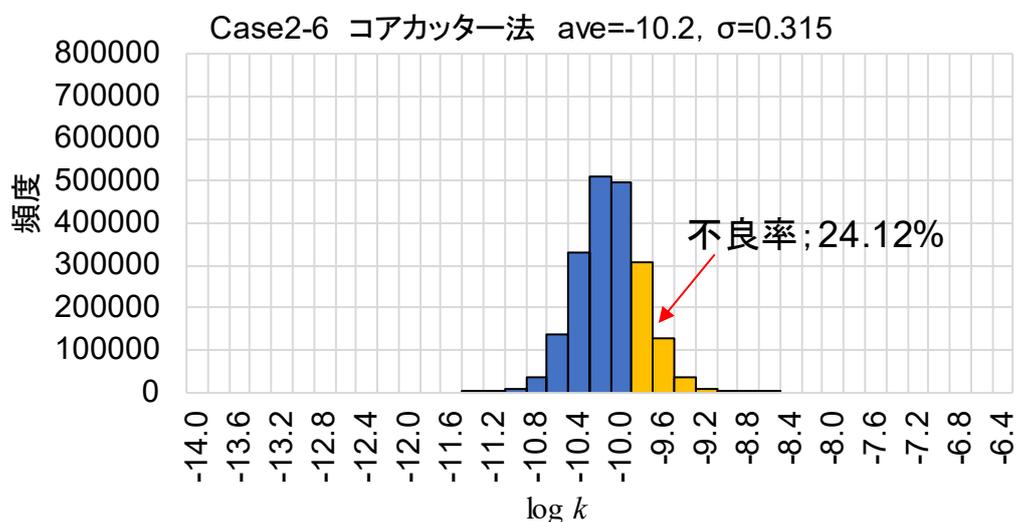


図 5.3-19 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case2-6)

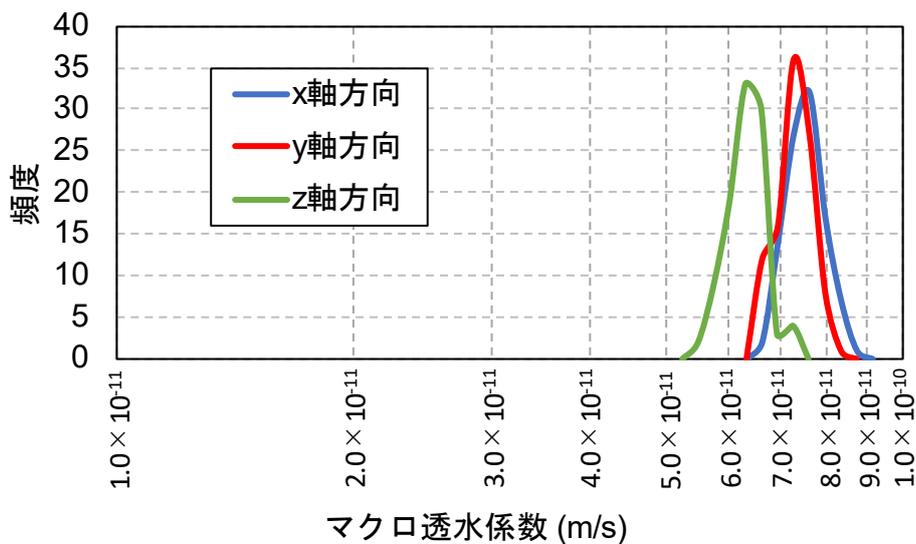


図 5.3-20 三軸方向のマクロ透水性係数 (Case2-6)

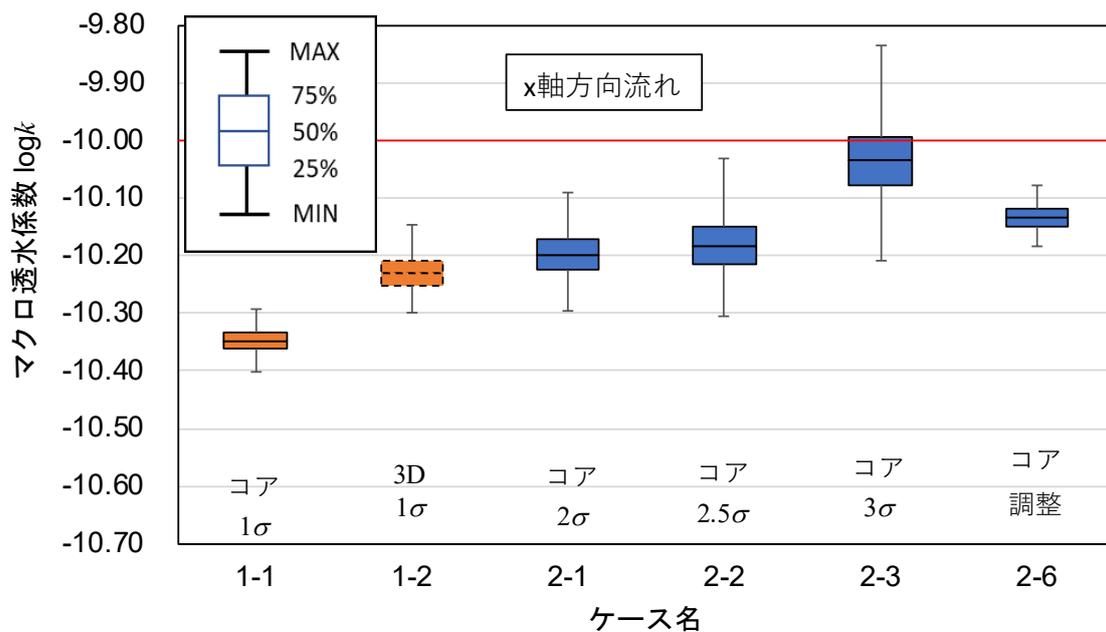


図 5.3-21 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-6, x 軸方向流れ)

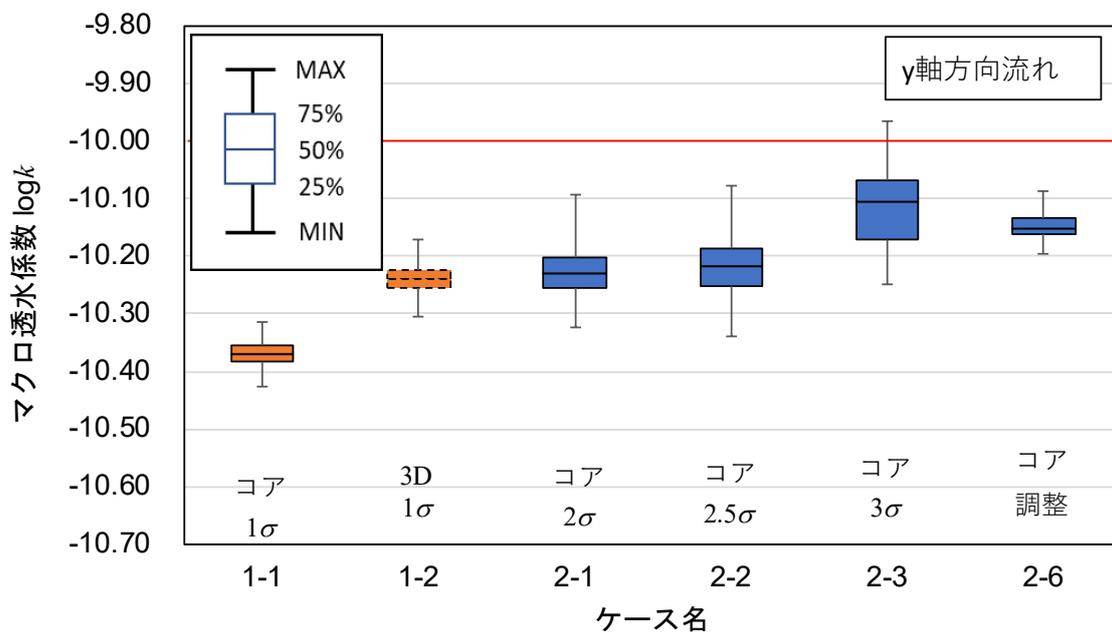


図 5.3-22 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-6, y 軸方向流れ)

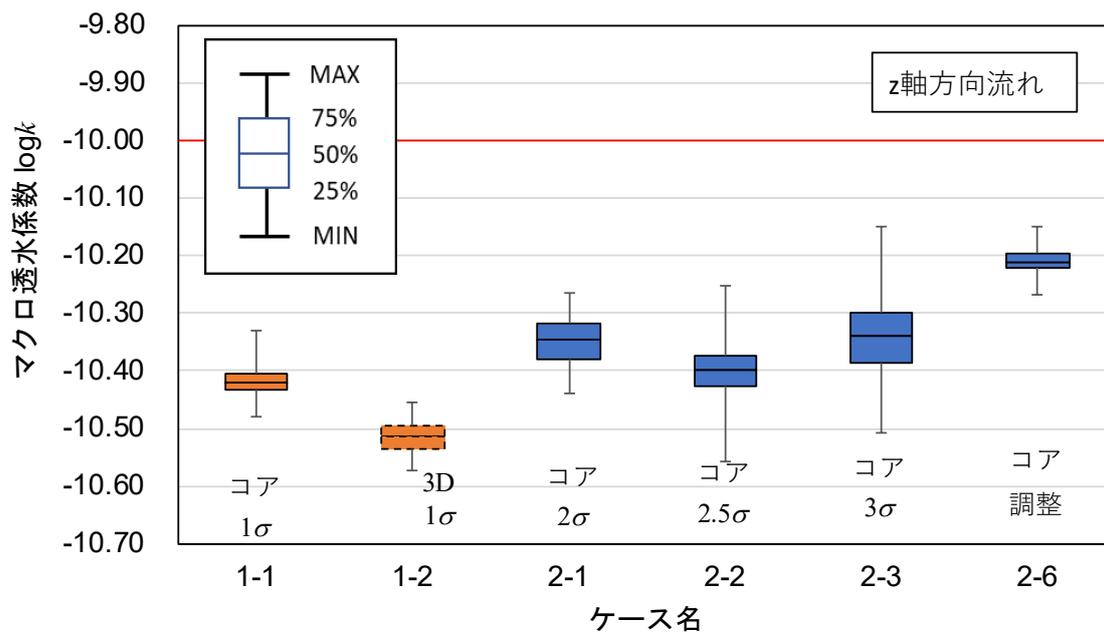


図 5.3-23 マクロ透水係数の計算結果 (Case2-6, z 軸方向流れ)

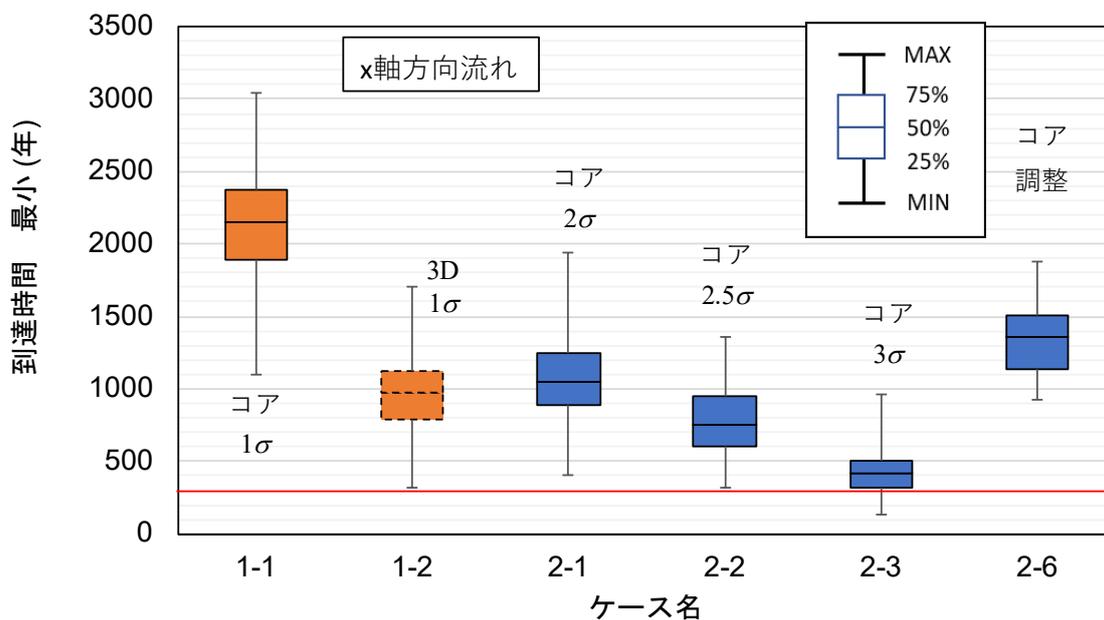


図 5.3-24 到達時間 (最小値) (Case2-6, x 軸方向流れ)

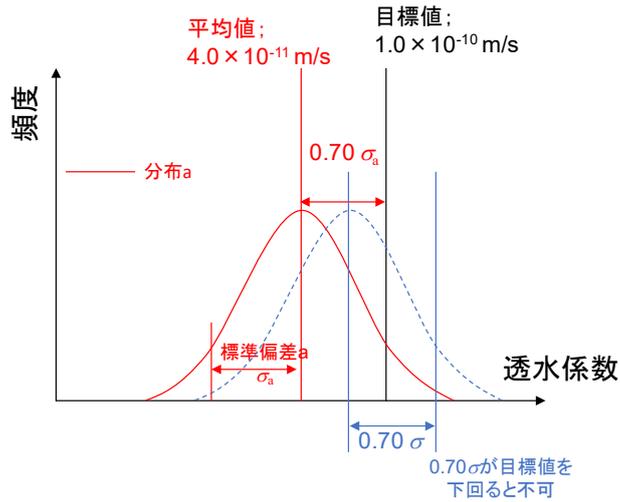


図 5.3-25 対数透水性の平均値と目標値との差の標準偏差による品質管理の概念

ここで、もう一度図 5.2-22 や図 5.2-24 で示した計算過程で生じるばらつきの影響を評価した条件付きシミュレーション後の透水性の頻度分布を、図 5.3-26 や図 5.3-27 のように再整理する。Case1-1 と Case1-1_2 の不良率を比較すると 5.4% 差、Case1-2 と Case1-2_2 の不良率を比較すると 3.8% 差である。不良率の推定精度に $\pm 5.0\%$ 程度の誤差が生じるとすると、不良率の許容範囲は $24.0 \pm 5.0\%$ の精度を持ち、この時の対数透水性の平均値と目標値の距離は、標準偏差に対する倍数で表すと 0.70 ± 0.16 倍程度の精度を持つと考えられる。

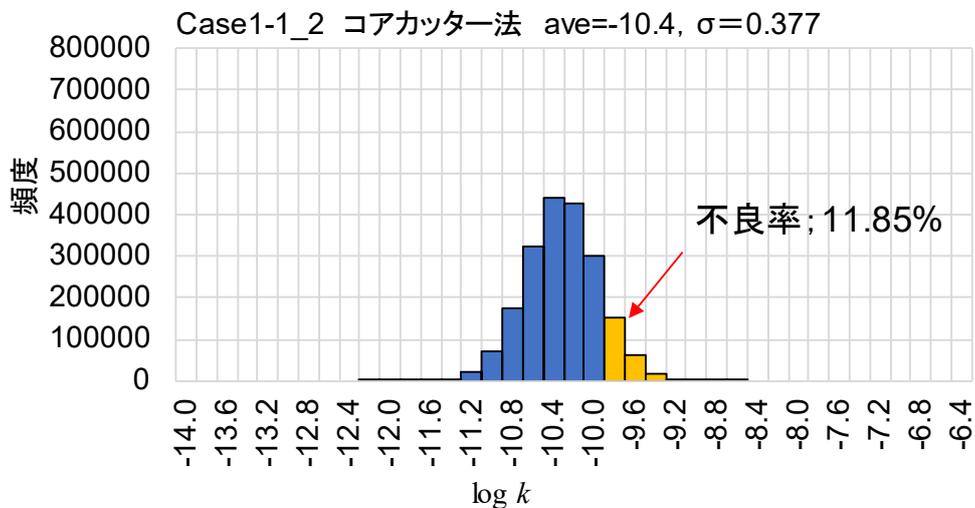


図 5.3-26 条件付きシミュレーション後の透水性の頻度分布 (Case1-1_2, 再整理)

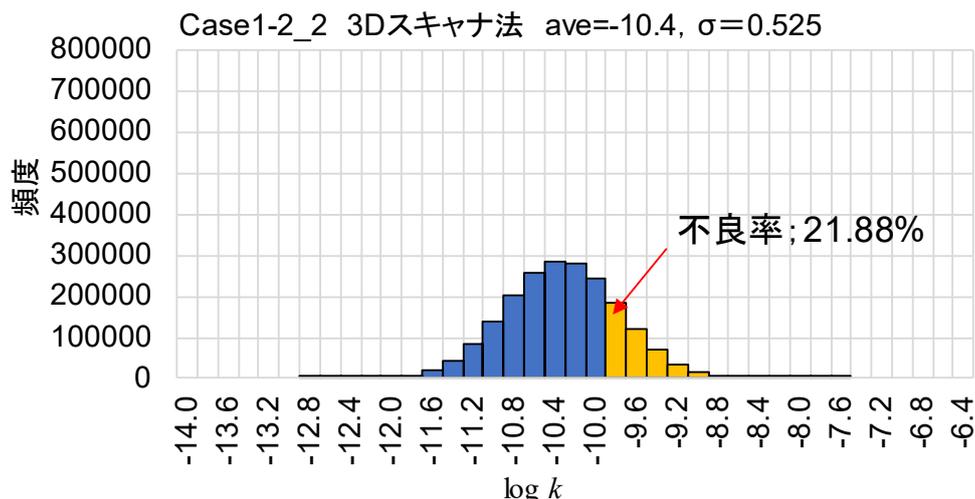


図 5.3-27 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case1-2_2, 再整理)

5.4 解析手法による測定頻度の影響確認

5.4.1 解析目的と解析条件

本節では、測定頻度の設定について検討する。入力値のデータセットは、施工試験で取得したデータを元に、データの欠損部を設ける操作を行い、測定頻度が少ないデータセットを作成して行う。本節で行う解析のイメージを図 5.4-1 に示す。測定点と測定点の間隔が広くなれば、その間のデータ補間の幅が大きくなることが予想される。本節ではその影響がどの程度かを確認する。

本研究では、実際の施工において、本施工の前に行う試験施工（試験盛土）において統計的に十分な頻度でデータを採取し、地球統計学委的手法における要となるシルやレンジの評価を行うことができる場合を想定している。本節では、クリギングおよび条件付きシミュレーションに入力するパラメータのうち、シルおよびレンジを Case1-1 や Case1-2 と同じ値を用いることを基本とする。また、測定点数に該当するシルおよびレンジを計算して適用する場合と、Case1-1 や Case1-2 と同じ値を用いた場合を比較して影響を評価する。分散や平均値は測定点数に応じた分散（母集団の分散の推定値）や平均値（標本数に応じた平均値）を入力値とする。母集団の分散の推定値は、図 5.4-2 に示すように実際に測定される標本集団の分散から推定する。この時、サンプルサイズを n 、母集団の分散を σ^2 、標本集団の分散を s^2 、信頼係数を 95% とすると、数式 5.4-1 より σ^2 の 95% 信頼区間を求めることができる。ただし、 $\chi_{0.025}^2$ は自由度が $(n-1)$ のカイ二乗分布における上側確率が 2.5% となる値を、 $\chi_{0.975}^2$ は下側確率が 97.5% となる値を示す。数式 5.4-1 で求めた 95% 信頼区間の幅で分散の精度が決まるとした場合、サンプル数に応じてマクロ透水係数の計算精度が異なることが考えられる。この影響については後述する。

$$\frac{(n-1)s^2}{\chi_{0.025}^2(n-1)} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)s^2}{\chi_{0.975}^2(n-1)} \quad \text{数式 5.4-1}$$

ここで、

σ^2 : 母集団の分散, s^2 : 標本集団の分散, n : サンプル数, $\chi_{0.025}^2$: 自由度が $(n-1)$ のカイ二乗分布における上側確率が2.5%となる値, $\chi_{0.975}^2$: 自由度が $(n-1)$ のカイ二乗分布における上側確率が2.5%となる値

表 5.4-1 に解析ケースと条件の一覧表を示す。ここではまずシル・レンジが異なる場合の影響のみを確認するための解析ケースを抽出した。Case3-1～Case3-3 は Case1-1 の測定点数をそれぞれ半分, 1/4, 1/10 にしたケース, Case3-4 は Case1-2 の測定点を半減したケースである。抽出した測定点を図 5.4-3～図 5.4-9 に示す。対数透水係数の平均値・標準偏差は測定点数を減らして抽出したデータセットの値を用いて解析を実行した。

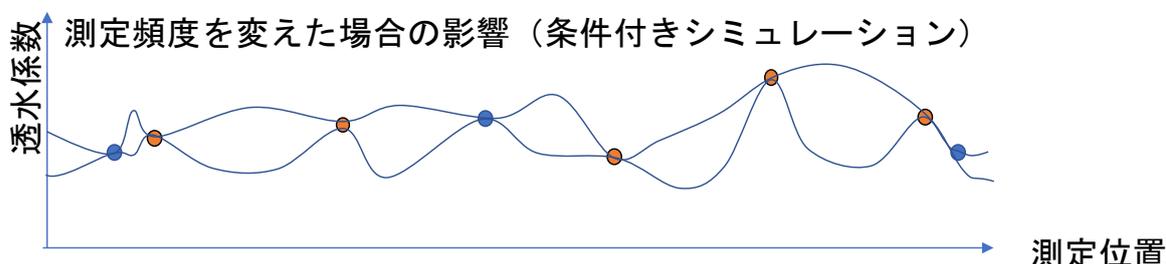


図 5.4-1 測定頻度を変更したモデルにおけるクリギングによる補間概念

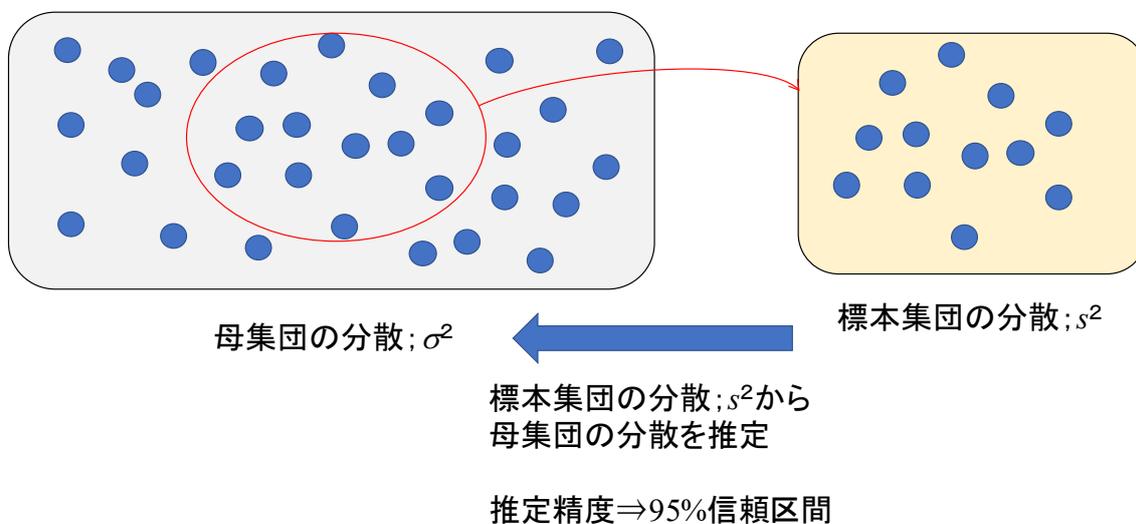


図 5.4-2 母集団の分散と標本集団の分散の概念図

表 5.4-1 解析ケースと入力値一覧表（測定頻度の設定検討）

ケース名	条件	対数透水係数 平均値	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case3-1	Case1-1 の測定点を半減	-10.37	0.0691	0.05	1.8	0.42
Case3-2	Case1-1 の測定点を 75%減	-10.35	0.0657	0.05	1.8	0.42
Case3-3	Case1-1 の測定点を 10%まで減	-10.38	0.0572	0.05	1.8	0.42
Case3-4	Case1-2 の測定点を半減	-10.44	0.1878	0.0008	1.8	0.30
Case3-1_2	Case3-1 のシル・レンジを変更.	-10.37	0.0691	0.09	2.5	1.0
Case3-2_2	Case3-2 のシル・レンジを変更	-10.35	0.0657	0.085	3.0	1.0
Case3-3_2	Case3-3 のシル・レンジを変更	-10.38	0.0572	0.07	4.0	1.0
Case3-4_2	Case3-4 のシル・レンジを変更	-10.44	0.1878	0.015	2.2	0.55

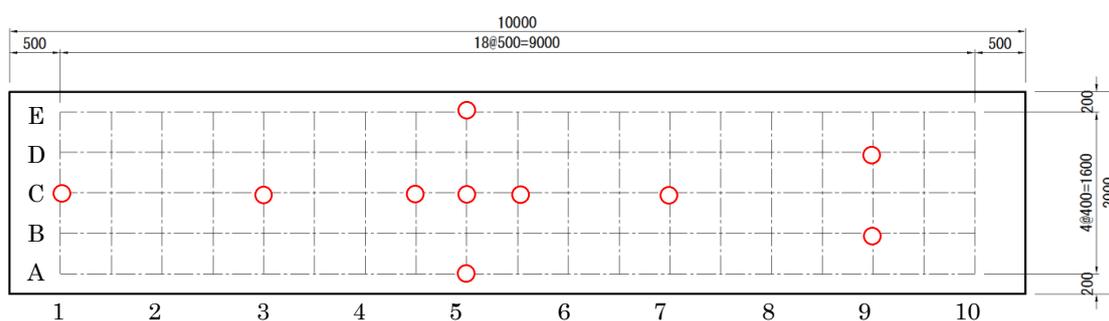


図 5.4-3 Case3-1 で抽出した測定点（奇数層）

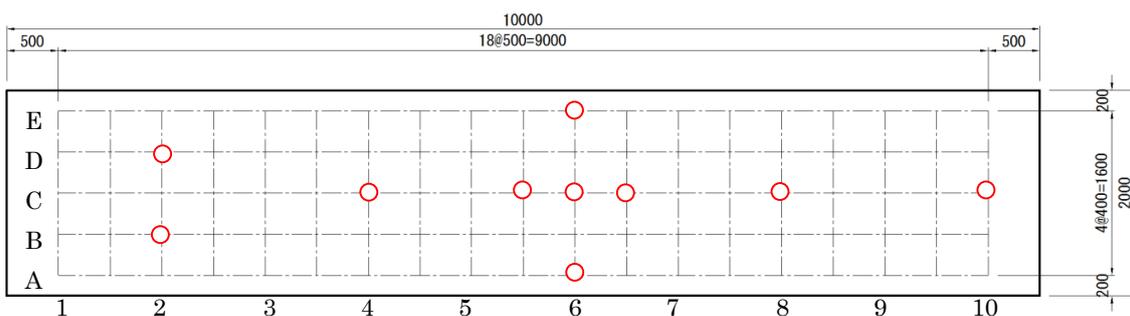


図 5.4-4 Case3-1 で抽出した測定点 (偶数層)

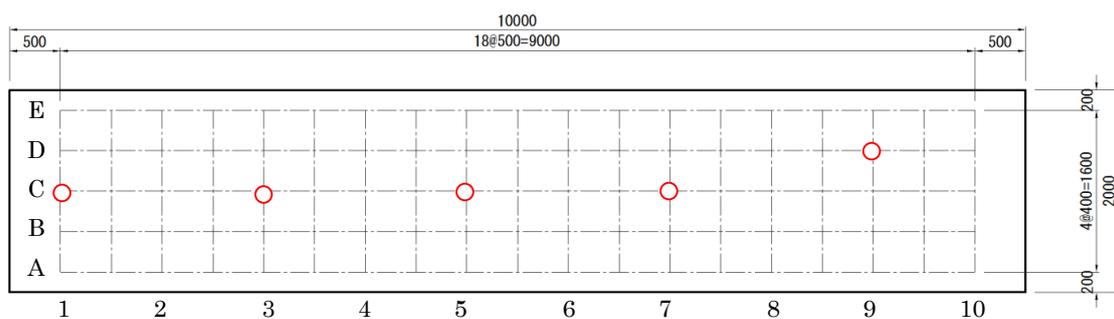


図 5.4-5 Case3-2 で抽出した測定点 (奇数層)

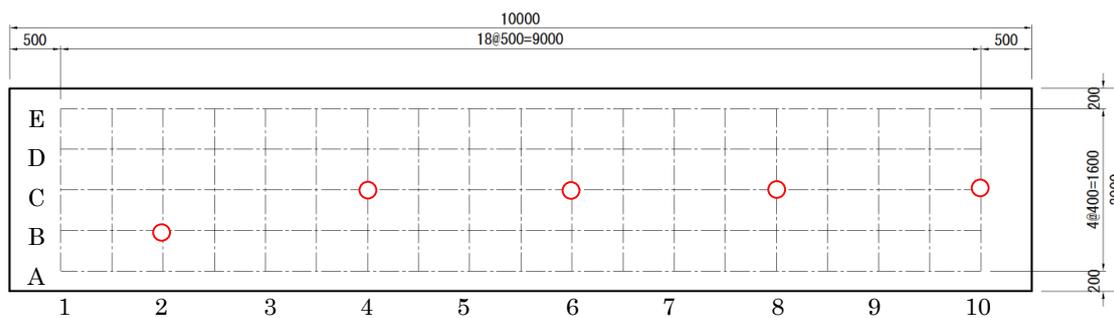


図 5.4-6 Case3-2 で抽出した測定点 (偶数層)

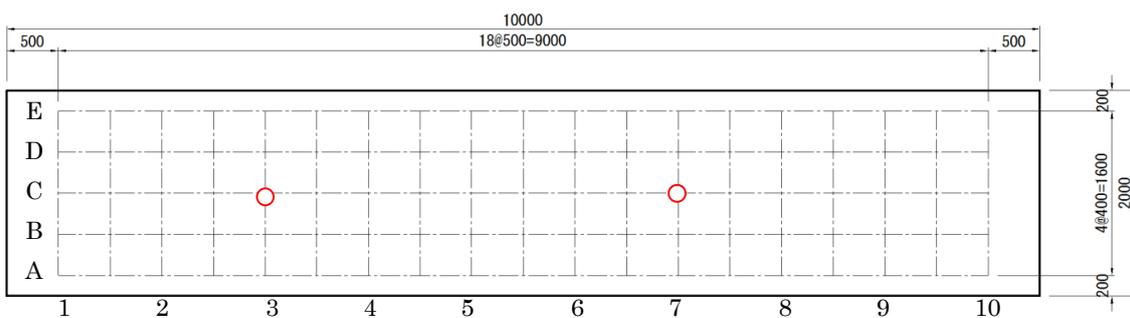


図 5.4-7 Case3-3 で抽出した測定点 (奇数層)

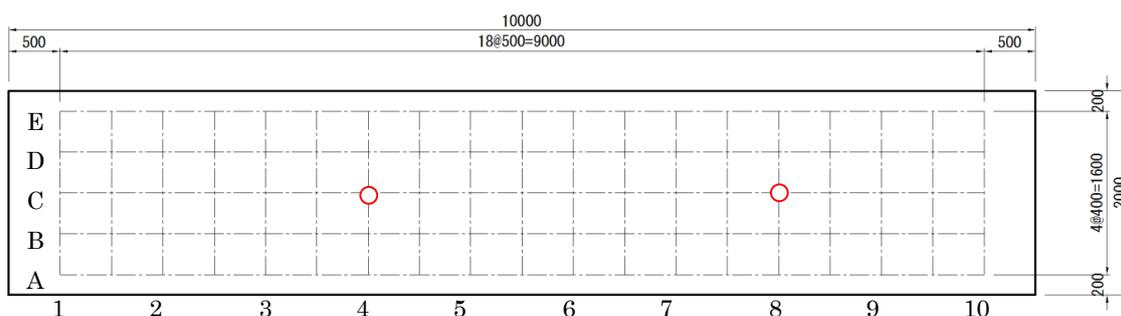


図 5.4-8 Case3-3 で抽出した測定点 (偶数層)

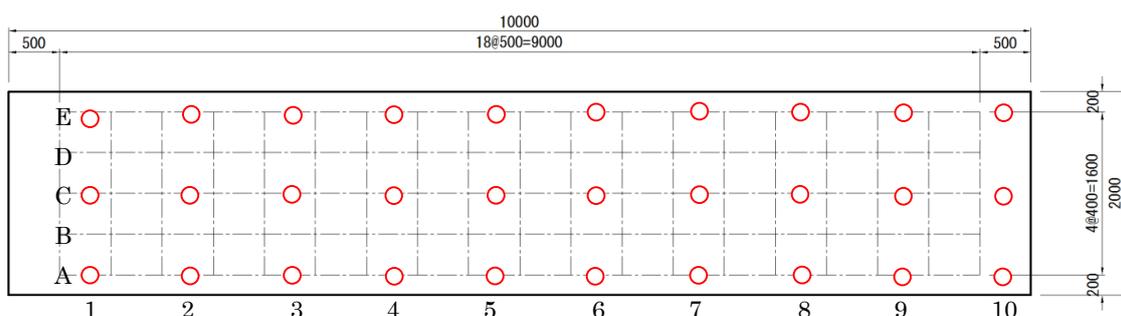


図 5.4-9 Case3-4 で抽出した測定点

5.4.2 解析結果

Case3-1~Case3-4 および Case3-1_2~Case3-4_2 のクリギングおよび条件付きシミュレーションの結果を図 5.4-10~図 5.4-17 に示す. 測定頻度に応じてシルやレンジを変更しても結果に大きく影響していないことがわかった. 平均値や分散が測定点数によらずあまり大きく変わらないためであると考えられる.

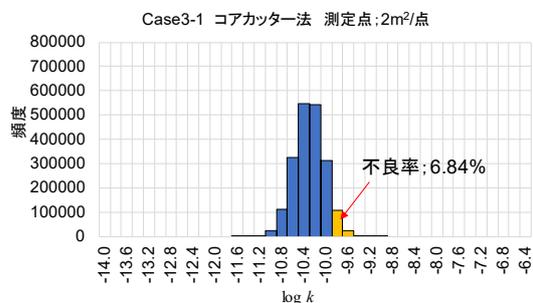


図 5.4-10 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-1)

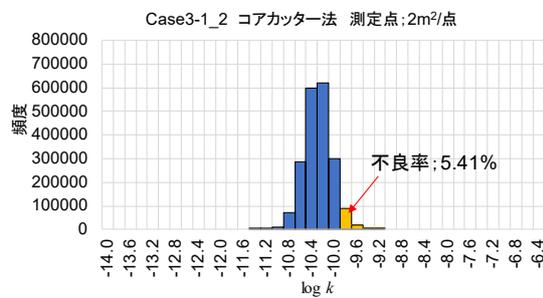


図 5.4-11 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-1_2)

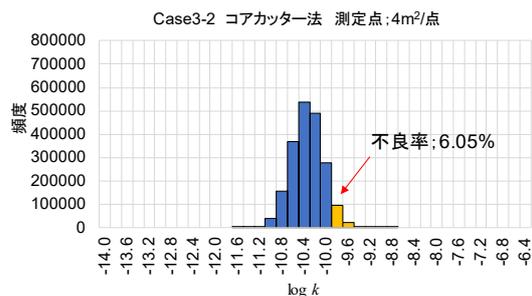


図 5.4-12 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-2)

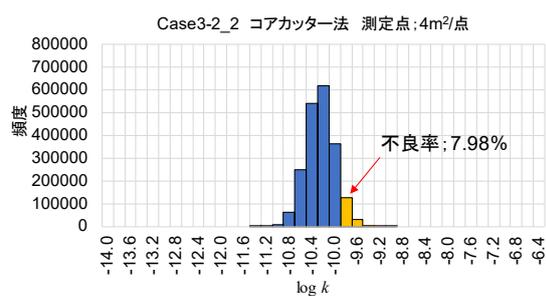


図 5.4-13 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-2_2)

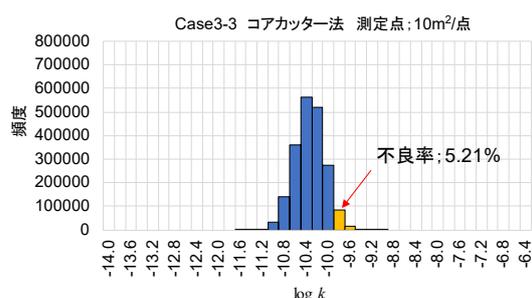


図 5.4-14 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-3)

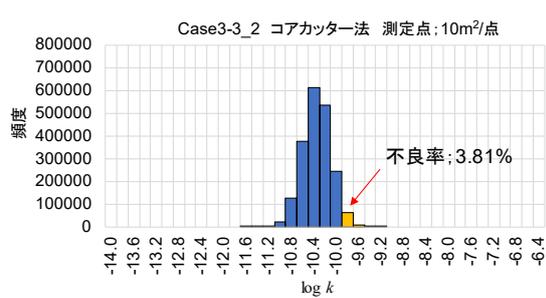


図 5.4-15 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-3_2)

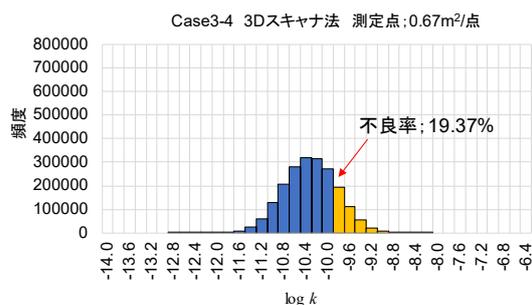


図 5.4-16 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-4)

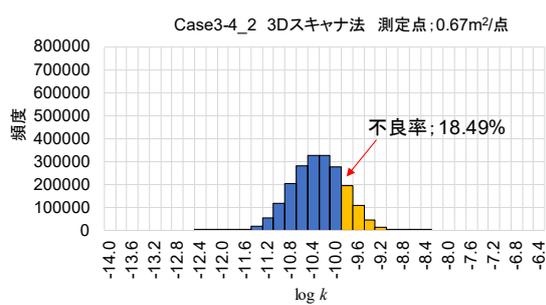


図 5.4-17 条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布 (Case3-4_2)

Case3-1~Case3-4 および Case3-1_2~Case3-4_2 の3軸方向流れにおけるマクロ透水係数の結果を図 5.4-18~図 5.4-25 に示す。これらのケースでも、x軸方向流れとy軸方向流れが同程度であり、Case3-1~Case3-3 ではほぼ一致し、z軸方向流れのマクロ透水係数が小さくなる傾向が見られた。

シルやレンジを変更して計算した Case3-1~Case3-4 と Case3-1_2~Case3-4_2 の結果を比較すると、シルやレンジを測定頻度に応じて設定した方が、マクロ透水係数の分布範囲が広がり、高めのマクロ透水係数となる傾向となったが、シルやレンジの変更による影響は小さいといえる。

このことより本研究では、本施工の前に行う試験施工（試験盛土）において統計的に十分な頻度でデータを採取し、地球統計学的手法におけるシルやレンジの設定を行うという想定で検討を進める。

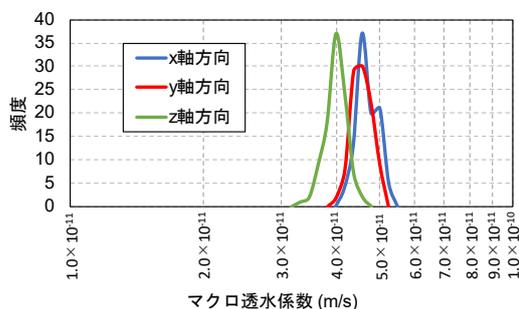


図 5.4-18 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-1)

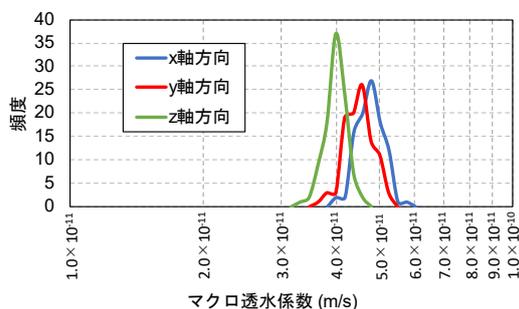


図 5.4-19 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-1_2)

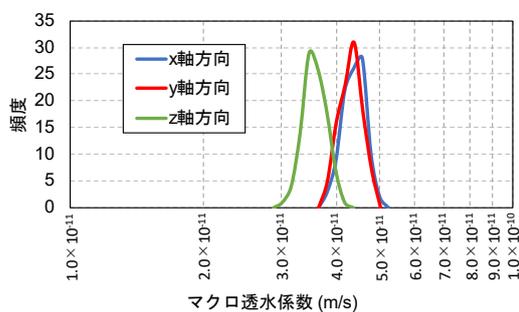


図 5.4-20 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-2)

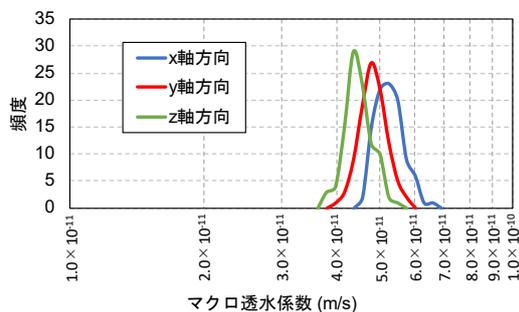


図 5.4-21 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-2_2)

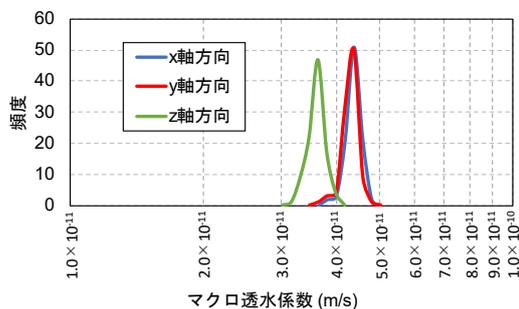


図 5.4-22 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-3)

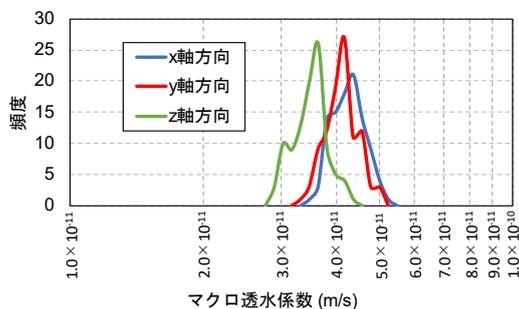


図 5.4-23 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-3_2)

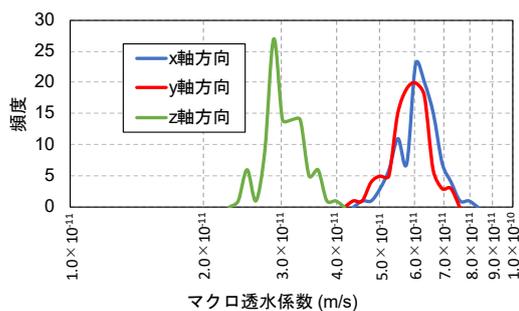


図 5.4-24 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-4)

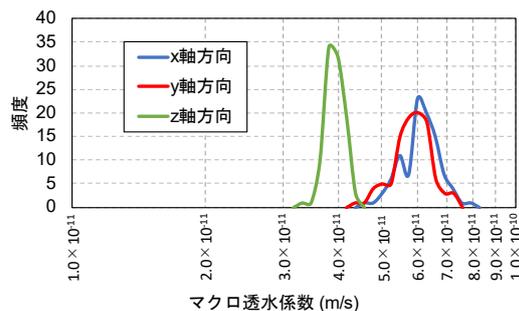


図 5.4-25 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-4_2)

図 5.4-11～図 5.4-15 の透水係数を空間に配置して三次元飽和定常浸透流解析を行った結果のうち、Case1-1、Case1-2 と Case3-1～Case3-4 のマクロ透水係数の比較結果を図 5.4-26～図 5.4-28 に、粒子追跡法による到達時間の最小値を図 5.4-29 に示す。コアカット一法による測定に関して言えば、測定頻度が 1m²/点～10m²/点まで測定頻度を少なくすることで、有意な差が生じるわけではないが、ばらつきが大きくなる傾向がみられた。これは、母集団の分散の推定値の 95%信頼区間の分布幅を考慮しない場合、測定頻度によらず分散の値が概ね同じような値であったためであると考えられる。これは 3D スキャナによる方法で測定したデータを用いた Case3-4 の場合でも同様の傾向がみられた。

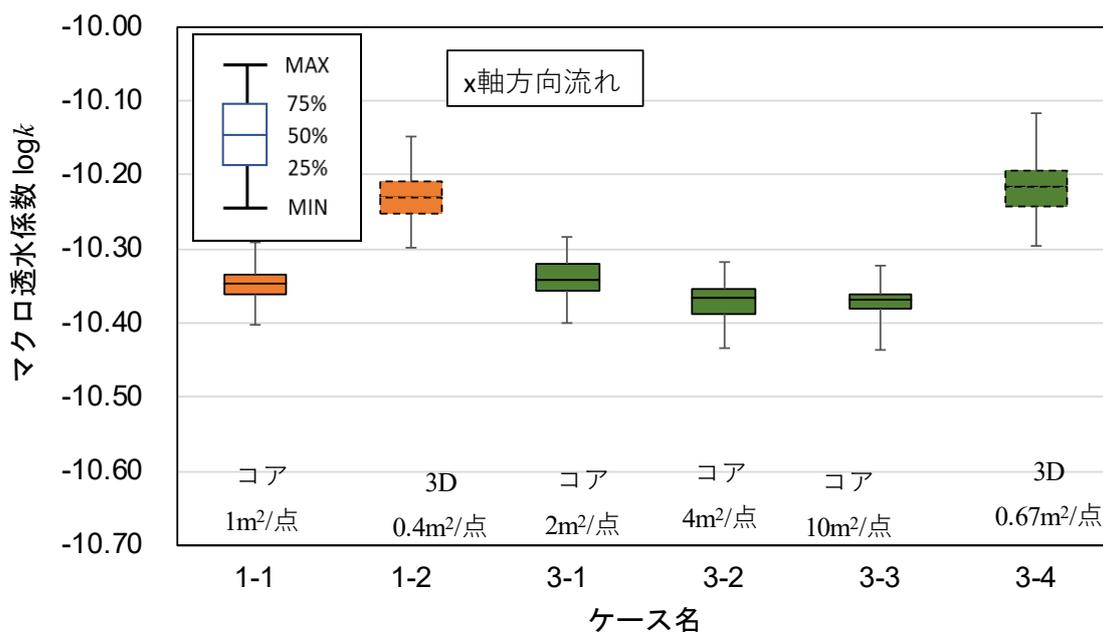


図 5.4-26 マクロ透水係数の計算結果 (Case3-1～Case3-4, x 軸方向流れ)

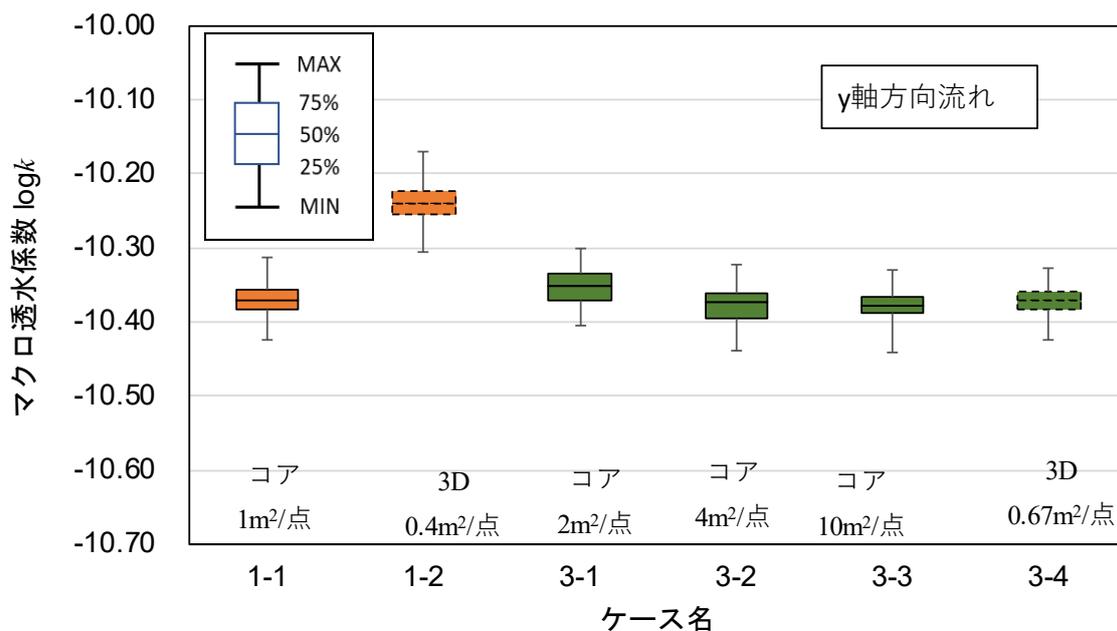


図 5.4-27 マクロ透水係数の計算結果 (Case3-1~Case3-4, y 軸方向流れ)

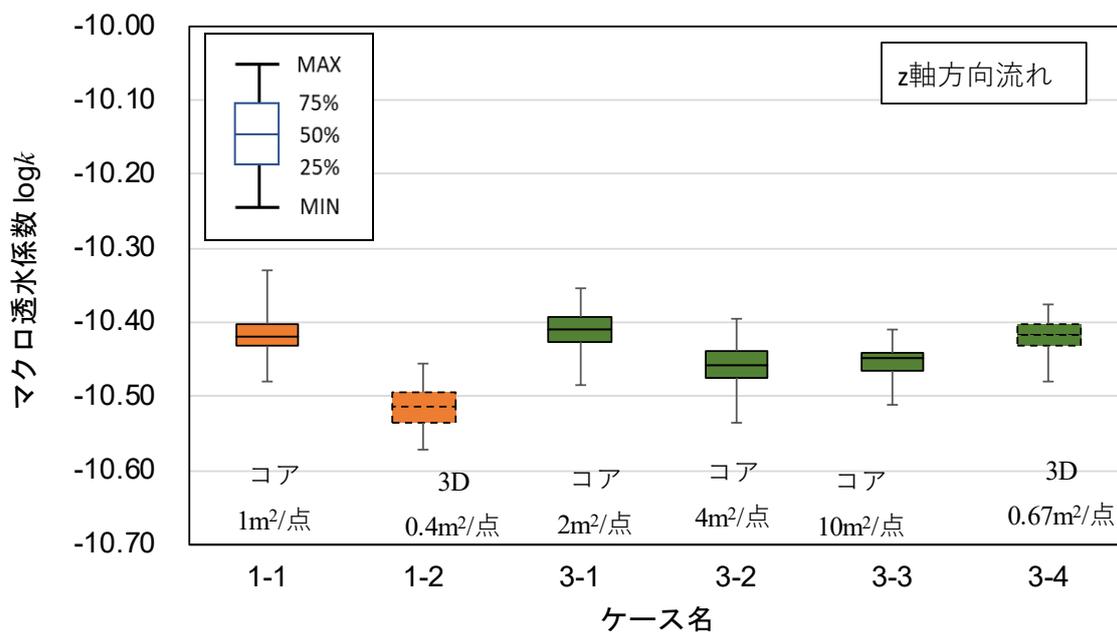


図 5.4-28 マクロ透水係数の計算結果 (Case3-1~Case3-4, z 軸方向流れ)

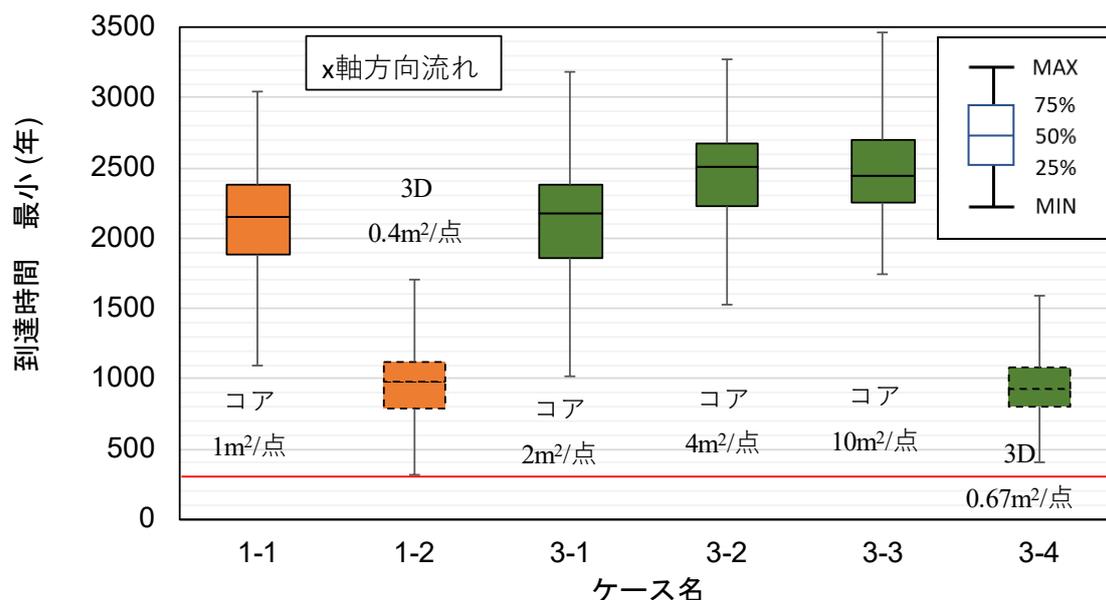


図 5.4-29 到達時間（最小値）（Case3-1～Case3-4, x 軸方向流れ）

5.4.3 測定点数による計算精度の検証

サンプル数により母集団の分散の推定値の95%信頼区間は数式 5.4-1 によって求められる。この95%信頼区間の幅が分散の精度とした場合のマクロ透水係数の計算精度を評価する。数式 5.4-1 で求めた母集団の分散の推定値の95%信頼区間の上限側に、クロスバリデーションの推定精度を加えた値を計算精度の検証解析の入力値（分散）とした。表 5.4-2 に測定頻度の違いによる計算精度の検証のための解析ケースと入力値一覧表を示す。

表 5.4-2 解析ケースと入力値一覧表（測定頻度の違いによる計算精度の検証）

ケース名	条件	対数透水係数 平均値	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case3-1_3	Case3-1_2 の分散 を変更。	-10.37	0.1533	0.09	2.5	1.0
Case3-2_3	Case3-2_2 の分散 を変更。	-10.35	0.1620	0.085	3.0	1.0
Case3-3_3	Case3-3_2 の分散 を変更。	-10.38	0.1819	0.07	4.0	1.0
Case3-4_3	Case3-4_2 の分散 を変更。	-10.44	0.2827	0.015	2.2	0.55

図 5.4-30～図 5.4-33 にクリギング・条件付きシミュレーション後の透水係数の頻度分布を示す。測定点数に応じた比較対象として、図 5.4-11, 図 5.4-13, 図 5.4-15, 図

5.4-17 を並列して再掲載した。計算精度検証用の分散の幅を大きくしたため、各ケースの不良率は5~10%程度大きくなっている。測定頻度を少なくすると、不良率の増加が大きくなる傾向となった。このため、測定頻度を少なくすると計算精度が落ちると考えられる。

図 5.4-30~図 5.4-33 に示した透水係数の分布を持つモデルを用いて計算したマクロ透水係数のヒストグラムを図 5.4-34~図 5.4-37 に示す。比較対象として図 5.4-19, 図 5.4-21, 図 5.4-23, 図 5.4-25 を並列して再掲載した。測定頻度を少ないほど分散の入力値が大きくなる傾向である。このため、Case3-1_3 はマクロ透水係数の計算結果の分布幅が大きくなった。さらに測定頻度を少なくした Case3-2_3 や Case3-3_3 は、マクロ透水係数の計算結果の分布幅が大きくなるとともに平均値も大きめになっていくのがわかる。本研究では目標の透水係数である 1.0×10^{-10} m/s を超過することはなかったが、測定頻度を少なくすると計算精度への影響があることを確認した。

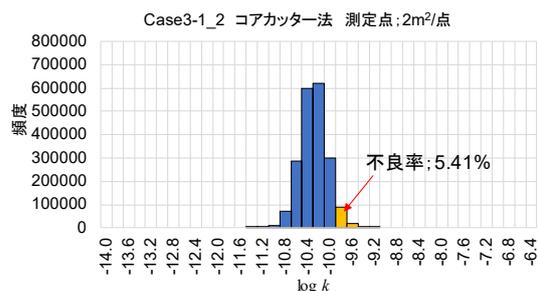


図 5.4-11 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-1_2)

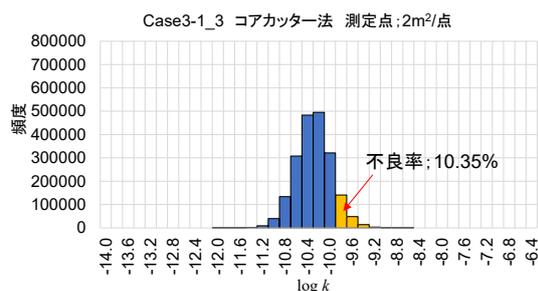


図 5.4-30 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-1_3)

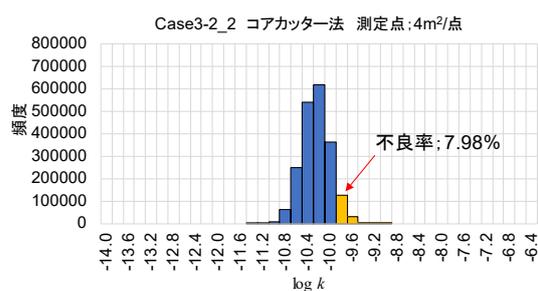


図 5.4-13 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-2_2)

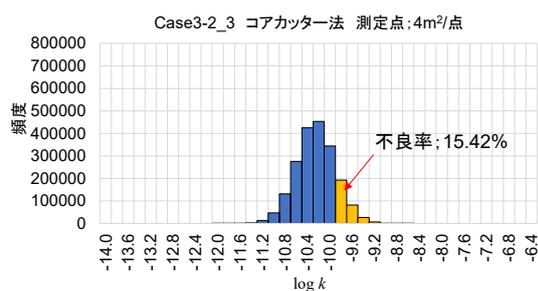


図 5.4-31 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-2_3)

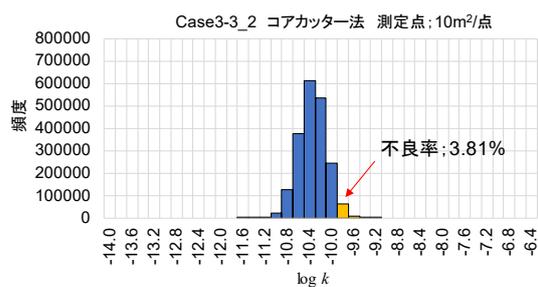


図 5.4-15 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-3_2)

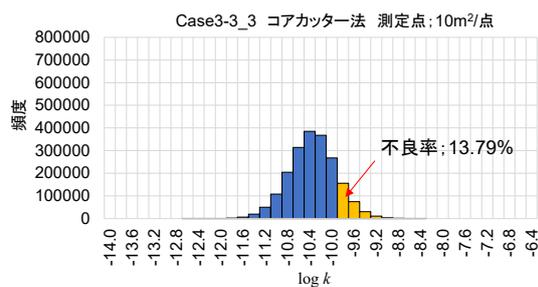


図 5.4-32 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-3_3)

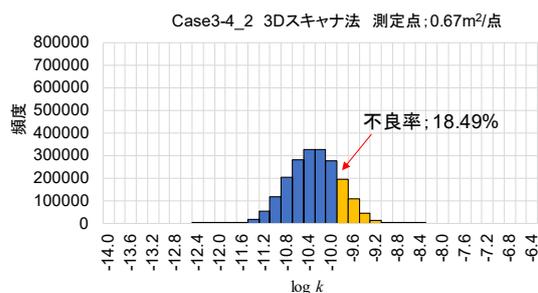


図 5.4-17 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-4_2)

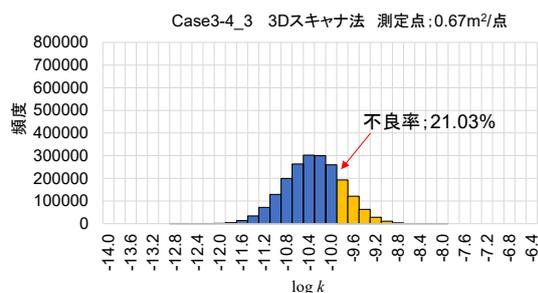


図 5.4-33 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case3-4_3)

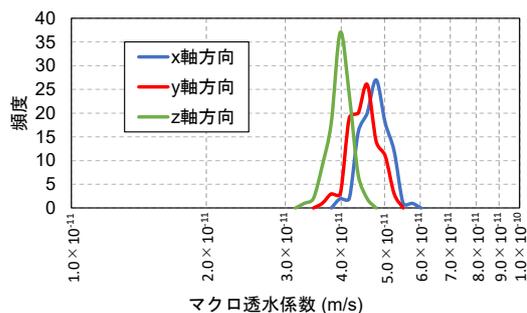


図 5.4-19 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-1_2)

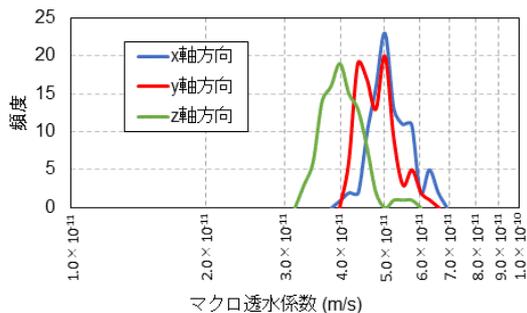


図 5.4-34 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-1_3)

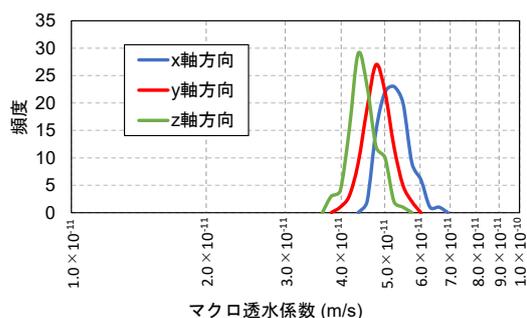


図 5.4-21 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-2_2)

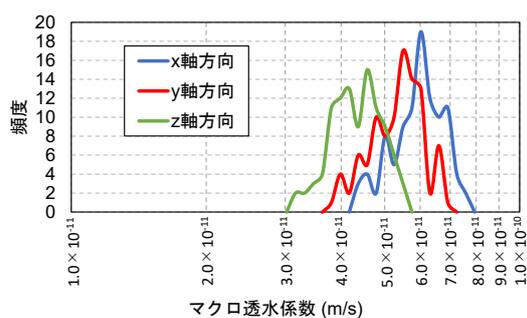


図 5.4-35 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-2_3)

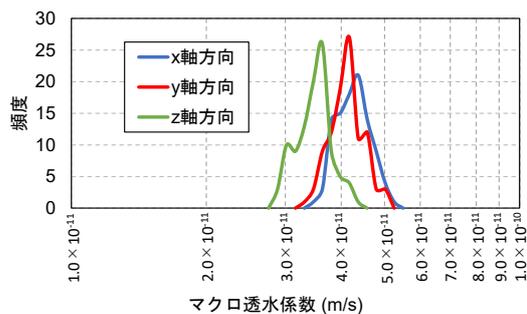


図 5.4-23 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-3_2)

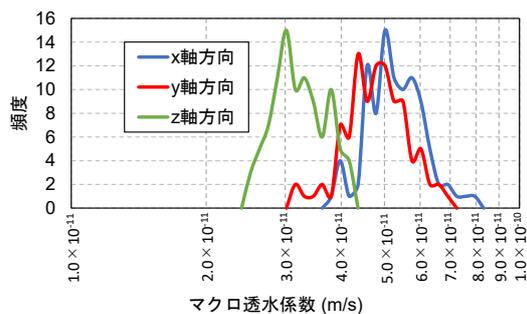


図 5.4-36 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-3_3)

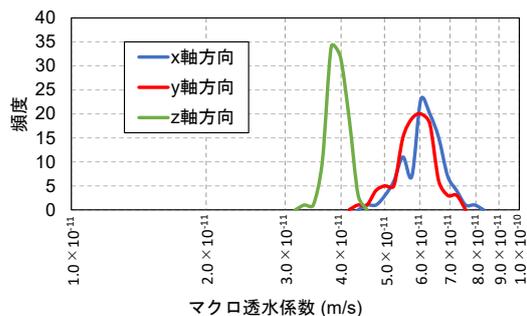


図 5.4-25 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-4_2)

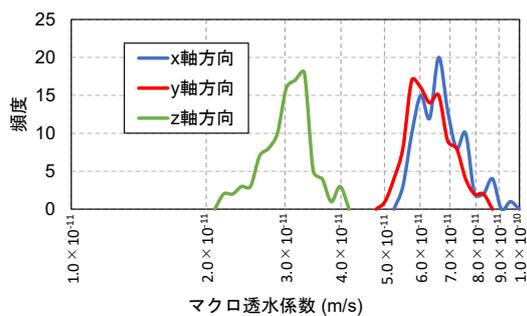


図 5.4-37 三軸方向のマクロ透水係数 (Case3-4_3)

5.5 含水比・混合率のばらつきによる透水性への影響評価

5.5.1 ベントナイト混合土の練り混ぜ製造時の目標設定

2章で示した施工試験時において、ベントナイト混合土の製造時における混合率・含水比のばらつきの許容値、すなわち製造時の目標値を含水比は $19.0 \pm 2.0\%$ 、混合率は $30.0 \pm 2.0\%$ に暫定的に設定した。本章では、混合率・含水比のばらつきの許容値を4章で示した施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法によりマクロ透水係数と到達時間を計算し評価する。

具体的には、4.2節で実施した解析ケースのうち、コアカッター法および3Dスキャナによる方法の乾燥密度の測定結果を転用する。これらの乾燥密度の測定結果と $\pm 1.0 \sim 3.0\%$ までばらつきを与えた含水比および混合率とを組み合わせた場合の影響を考慮する。これは、3章で示した代替指標より透水係数をするとき、乾燥密度のばらつきと同様に含水比と混合率のばらつきの影響を評価するものである。そのため、本章では、乾燥密度の測定結果はそのまま利用し、含水比と混合率のばらつきの幅を変更して計算を行う。

5.5.2 所定の分布幅を持った含水比・混合率のデータセットの作成

所定の分布幅を持った含水比・混合率のデータセットの作成は、本章でも4.3節で使用した、表計算プログラム（Microsoft社；EXCELを使用）の機能のうち、正規分布の積分関数の逆関数の機能（EXCELの関数のうちNORMINV）を活用した。本章では、含水比・混合率の分布が正規分布を呈すると仮定して、各測定点に対する含水比・混合率を発生させた。この表計算プログラムの正規分布の積分関数の逆関数の機能の入力値は0～1までの任意の値、平均値（含水比は19.0%、混合率は30.0%とした）、標準偏差である。このうち、0～1までの任意の値は乱数を発生させて入力値とした。標準偏差の値を操作し、含水比は $19.0\% \pm 1.0\%$ 、 $19.0\% \pm 2.0\%$ 、 $19.0\% \pm 3.0\%$ 、混合率は、 $30.0\% \pm 1.0\%$ 、 $30.0\% \pm 2.0\%$ 、 $30.0\% \pm 3.0\%$ の値の幅の分布を持つようにした。生成した含水比・混合率のデータセットを表5.5-1～表5.5-4に示す。コアカッター法による乾燥密度の測定結果は200点、3Dスキャナによる方法で測定した乾燥密度の測定結果は500点なので、それぞれのデータ数分だけのデータセットを作成した。

表 5.5-1 生成した含水比のデータセット（コアカッター法：200点用）

統計値	19.0±1.0	19.0±2.0	19.0±3.0
平均値	19.026	18.995	19.079
中央値	19.005	18.983	19.149
標準偏差	0.349	0.692	0.980
変動係数	0.018	0.036	0.051
最大値	20.294	20.850	21.258
最小値	18.285	16.800	15.257
幅	2.009	4.050	6.001
標本数	200	200	200

表 5.5-2 生成した混合率のデータセット（コアカッター法：200 点用）

統計値	30.0±1.0	30.0±2.0	30.0±3.0
平均値	29.980	29.948	30.040
中央値	29.963	29.932	30.107
標準偏差	0.325	0.757	0.989
変動係数	0.011	0.025	0.033
最大値	30.995	32.230	32.814
最小値	28.987	28.236	26.808
幅	2.008	3.994	6.006
標本数	200	200	200

表 5.5-3 生成した含水比のデータセット（3D スキャナによる方法：500 点用）

統計値	19.0±1.0	19.0±2.0	19.0±3.0
平均値	19.013	19.038	19.045
中央値	18.999	19.047	19.024
標準偏差	0.342	0.663	0.842
変動係数	0.018	0.035	0.044
最大値	20.302	20.850	22.690
最小値	18.262	16.800	16.686
幅	2.040	4.050	6.004
標本数	500	500	500

表 5.5-4 生成した混合率のデータセット（3D スキャナによる方法：500 点用）

統計値	30.0±1.0	30.0±2.0	30.0±3.0
平均値	30.003	29.989	29.991
中央値	29.998	29.974	30.019
標準偏差	0.334	0.647	0.922
変動係数	0.011	0.022	0.031
最大値	30.962	31.969	32.880
最小値	28.973	27.990	26.871
幅	1.988	3.980	6.009
標本数	500	500	500

5.5.3 代替指標と透水係数の相関式を用いた透水係数の計算

表 5.5-1～表 5.5-4 の値とコアカッター法および 3D スキャナによる方法で測定した乾燥密度とを組み合わせることで透水係数を算出した。含水比と混合率の分布幅の組み合わせは、±1.0%ならば±1.0%同士で組み合わせる。含水比と混合率の分布幅の組み合わせケースを表 5.5-5 に示す。

4 章で示した代替指標より透水係数を算出した結果の一覧表を表 5.5-6、表 5.5-7 に示す。透水係数は対数表記としている。これらの値を入力値としてクリギング・条件付きシミュレーションを実施した。

表 5.5-5 含水比と混合率の分布幅の組み合わせ

分布幅	±1.0%	±2.0%	±3.0%
含水比	19.0±1.0%	19.0±2.0%	19.0±3.0%
混合率	30.0±1.0%	30.0±2.0%	30.0±3.0%

表 5.5-6 代替指標との関係から求めた透水係数(対数表記, コアカッター法)

統計値	±1.0%	±2.0%	±3.0%
平均値	-10.471	-10.454	-10.478
中央値	-10.455	-10.475	-10.464
標準偏差	0.281	0.328	0.363
変動係数	-0.027	-0.031	-0.035
最大値	-9.726	-9.721	-8.954
最小値	-11.236	-11.290	-11.499
幅	1.510	1.569	2.545
標本数	200	200	200

表 5.5-7 代替指標との関係から求めた透水係数(対数表記, 3D スキャナによる方法)

統計値	±1.0%	±2.0%	±3.0%
平均値	-10.490	-10.449	-10.519
中央値	-10.441	-10.416	-10.452
標準偏差	0.416	0.457	0.496
変動係数	-0.040	-0.044	-0.047
最大値	-9.832	-9.391	-9.372
最小値	-11.875	-12.260	-12.327
幅	2.043	2.869	2.955
標本数	500	500	500

5.5.4 解析結果

クリギング・条件付きシミュレーションの解析ケースと入力値の一覧を表 5.5-8 に示す。クリギング・条件付きシミュレーションの解析結果を図 5.5-1～図 5.5-6 に示す。いずれのケースも対数透水係数は -10.00 m/s を超過した不良率は 23%を下回る結果となった。

表 5.5-9 に対数透水係数の平均値・目標値・標準偏差の関係(含水比・混合率のばらつきの影響)を示す。どのケースにおいても対数透水係数の平均値と目標値との差が 0.70σ を大きく上回る結果となった。これらのケースについてマクロ透水係数等を確認した。

表 5.5-8 解析ケースと入力値一覧表(含水比・混合率のばらつきの影響)

ケース名	条件	対数透水係数 平均値	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case4-1	Case1-1 の含水比・混合率を±1.0%の範囲に拡張	-10.471	0.0790	0.05	0.42	1.8
Case4-2	Case1-1 の含水比・混合率を±2.0%の範囲に拡張	-10.454	0.1078	0.05	0.42	1.8
Case4-3	Case1-1 の含水比・混合率を±3.0%の範囲に拡張	-10.478	0.1318	0.05	0.42	1.8
Case4-4	Case1-2 の含水比・混合率を±1.0%の範囲に拡張	-10.490	0.1730	0.0008	0.30	1.8
Case4-5	Case1-2 の含水比・混合率を±2.0%の範囲に拡張	-10.449	0.2088	0.0008	0.30	1.8
Case4-6	Case1-2 の含水比・混合率を±3.0%の範囲に拡張	-10.519	0.2456	0.0008	0.30	1.8

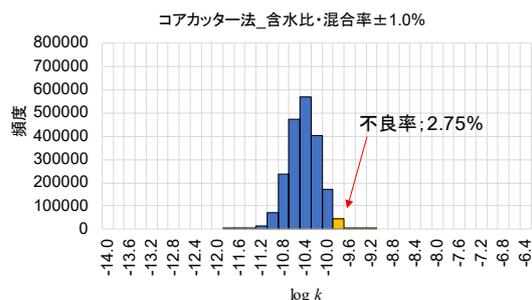


図 5.5-1 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-1)

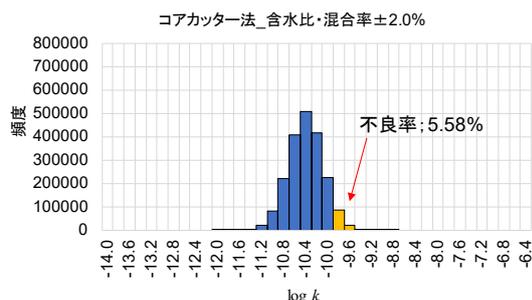


図 5.5-2 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-2)

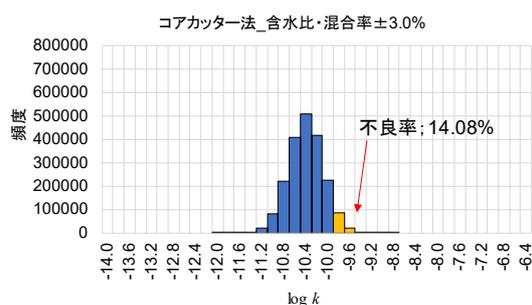


図 5.5-3 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-3)

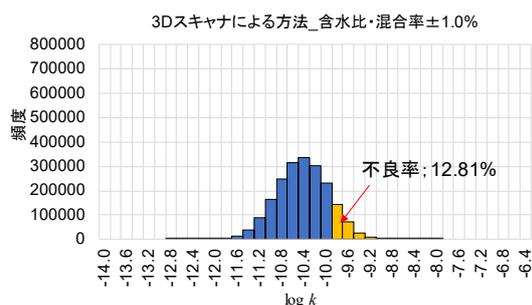


図 5.5-4 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-4)

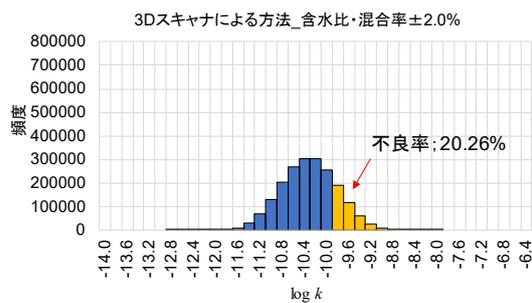


図 5.5-5 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-5)

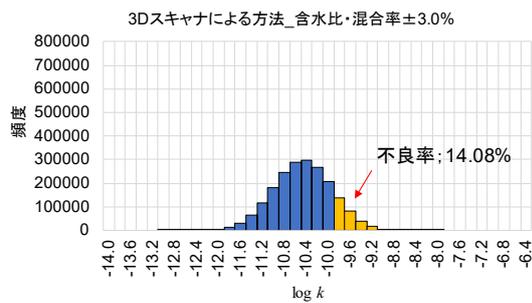


図 5.5-6 条件付きシミュレーション後の透水性係数の頻度分布 (Case4-6)

表 5.5-9 透水性係数の平均値・目標値・標準偏差の関係(含水比・混合率のばらつきの影響)

ケース名	分布幅	対数透水性係数 (log k)					不良率 (%)
		最大値	最小値	平均値	標準偏差 σ	logk = -10 と平均値の差	
Case4-1	±1.0%	-9.2	-11.9	-10.53	0.275	1.93 σ	2.7
Case4-2	±2.0%	-8.9	-12.0	-10.50	0.313	1.59 σ	5.6
Case4-3	±3.0%	-8.9	-11.6	-10.48	0.280	1.59 σ	14.1
Case4-4	±1.0%	-9.2	-11.9	-10.49	0.357	1.14 σ	12.8
Case4-5	±2.0%	-8.9	-12.1	-10.43	0.384	0.85 σ	20.3
Case4-6	±3.0%	-9.1	-12.2	-10.52	0.400	1.08 σ	14.1

Case4-1～Case4-6 までの 3 軸方向流れにおけるマクロ透水係数の結果を図 5.5-7～図 5.5-12 に示す。これらのケースでも、x 軸方向流れと y 軸方向流れが同程度であり、y 軸方向流れの方が若干低い値となった。また、z 軸方向流れのマクロ透水係数が小さくなる傾向が見られた。

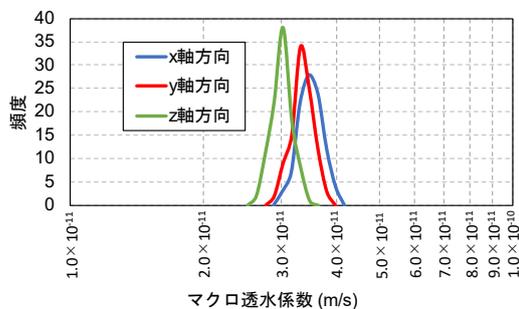


図 5.5-7 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-1)

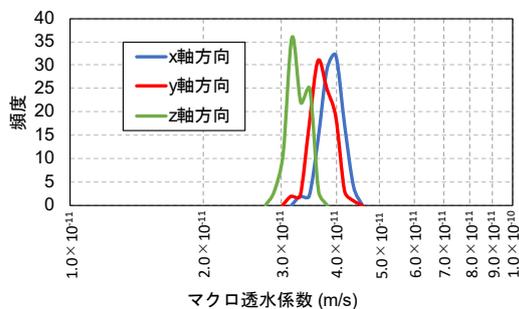


図 5.5-8 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-2)

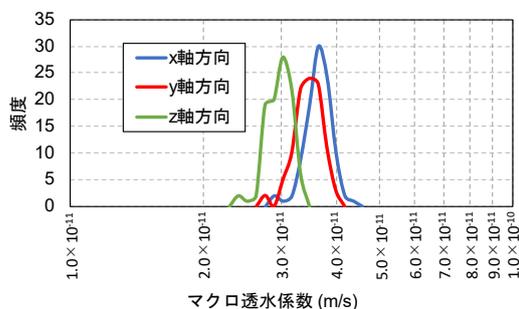


図 5.5-9 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-3)

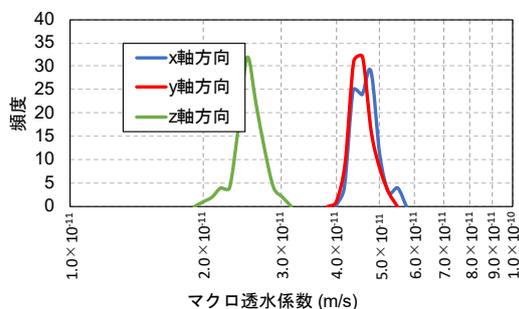


図 5.5-10 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-4)

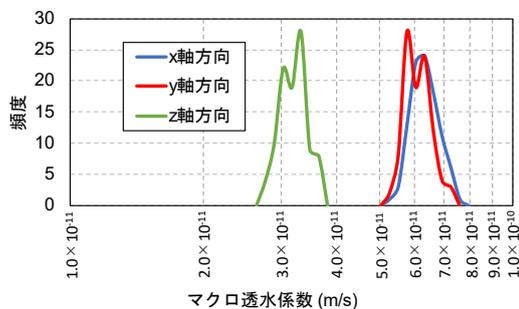


図 5.5-11 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-5)

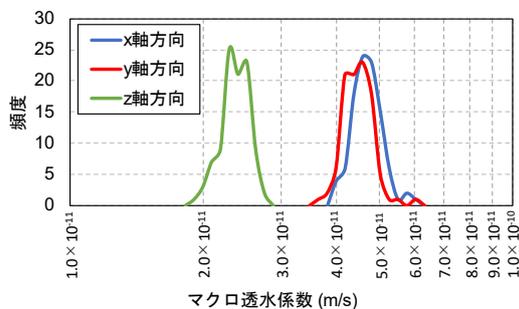


図 5.5-12 三軸方向のマクロ透水係数 (Case4-6)

図 5.5-1～図 5.5-6 の透水係数を空間に配置して三次元飽和定常浸透流解析を行った結果のうち、マクロ透水係数の結果を図 5.5-13～図 5.5-15 に、粒子追跡法による到達時間

の最小値を図 5.5-16 に示す。どのケースについてもマクロ透水係数が -10.00 m/s ($1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$) を超過することがなく、到達時間の最小値も 500 年以上となり、透水性能を十分に満足しているといえる。すなわち、含水比・混合率のばらつきの許容値を $\pm 3.0\%$ 以内としても、性能への影響は少ないといえる。

この結果より、材料の練り混ぜ製造時の管理目標として設定値 $\pm 3.0\%$ 以内（本研究の場合、含水比： $19.0 \pm 3.0\%$ ，混合率： $30.0 \pm 3.0\%$ ）という値が採択できると考えられる。

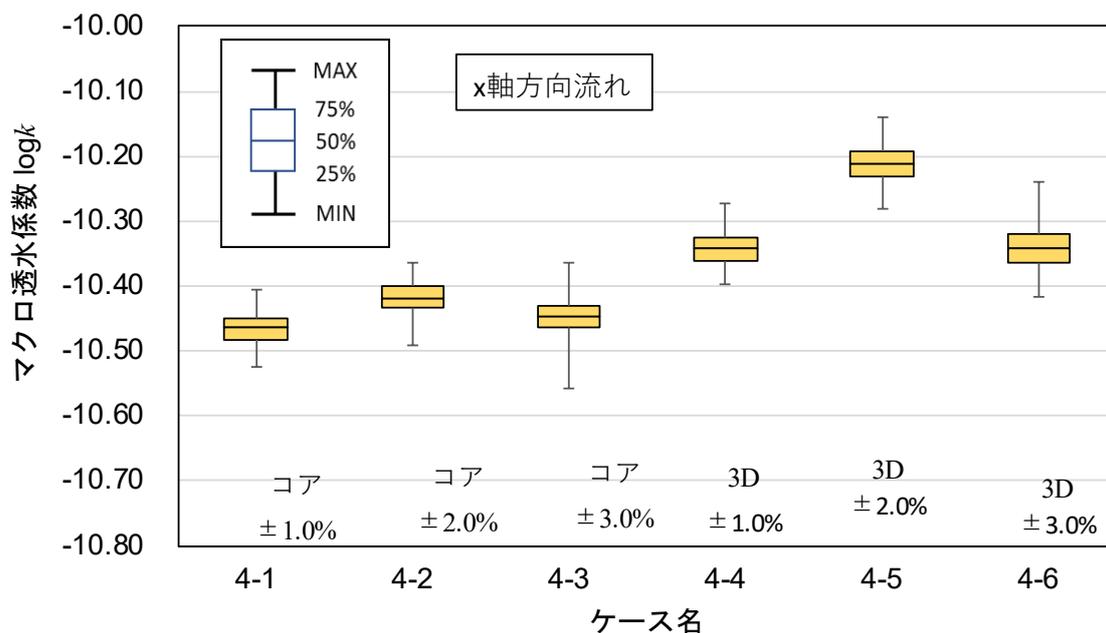


図 5.5-13 マクロ透水係数の計算結果 (Case4-1~Case4-6, x 軸方向流れ)

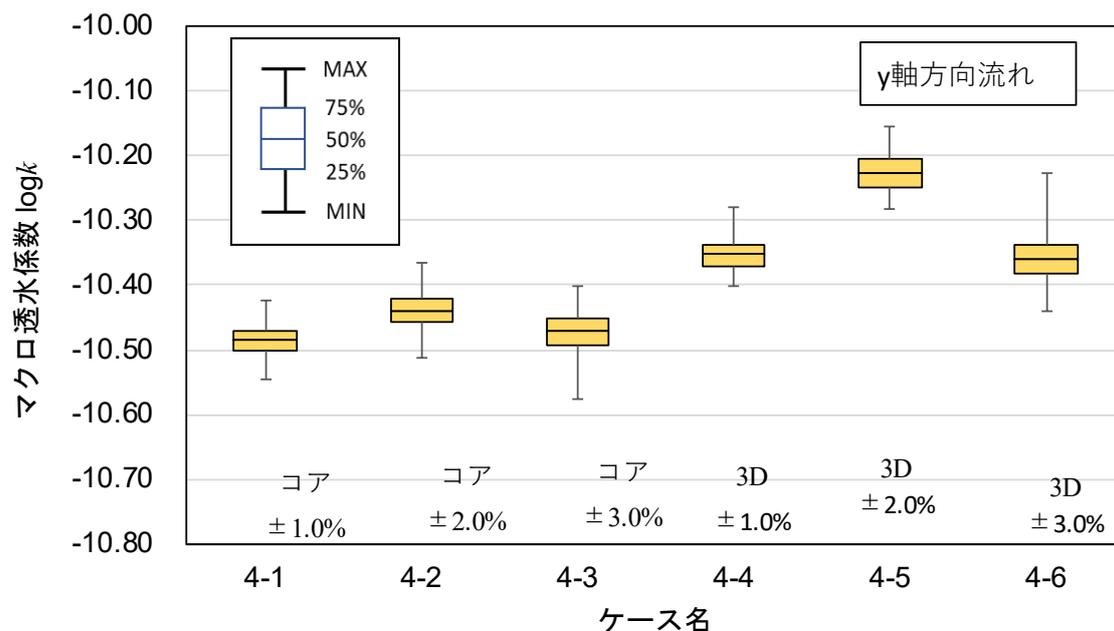


図 5.5-14 マクロ透水係数の計算結果 (Case4-1~Case4-6, y 軸方向流れ)

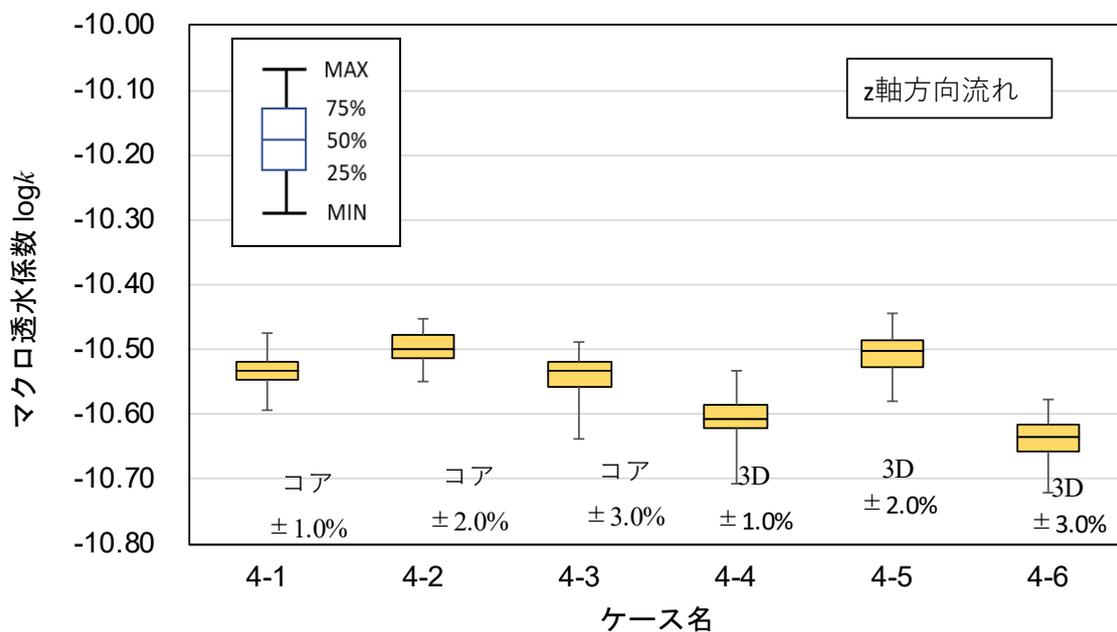


図 5.5-15 マクロ透水係数の計算結果 (Case4-1~Case4-6, z 軸方向流れ)

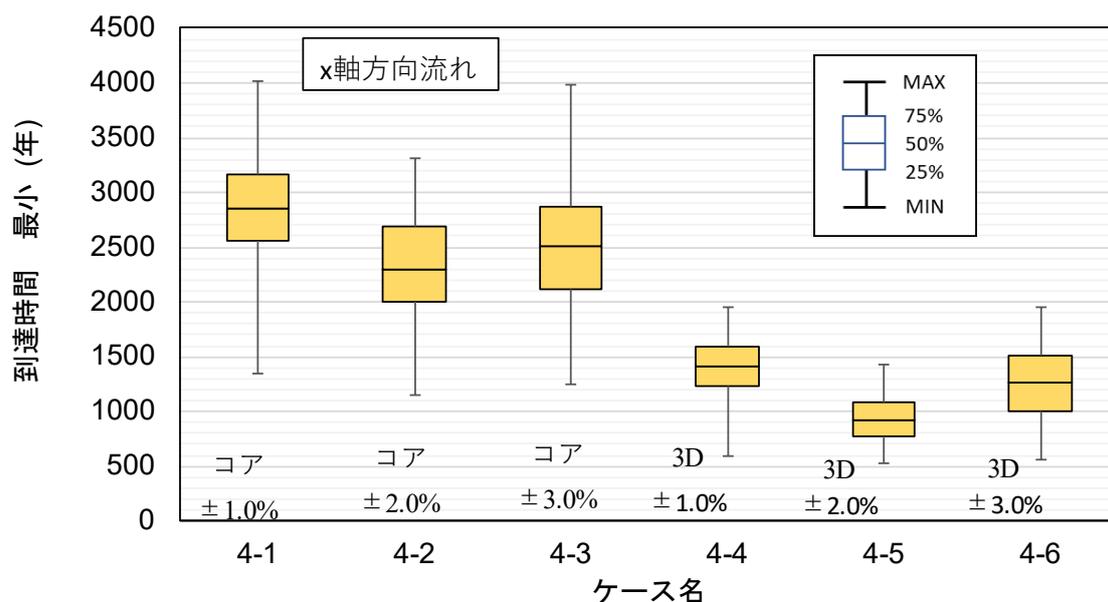


図 5.5-16 到達時間（最小値）（Case4-1～Case4-6, x 軸方向流れ）

5.6 5章のまとめ

本章では、施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法として、施工後のデータと第3章で示した代替指標との相関性より透水係数を求め、この透水係数の三次元空間への配置を数値解析により作成し構造物全体をモデル化すること、透水係数を配置した三次元モデル空間を用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施し、マクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）により透水性を評価するという方法について説明した。また、粒子追跡法を浸透流解析後の計算結果に適用することにより、ベントナイト混合土で構築した土構造物を水が横断し、地下水が処分施設に到達するまでの時間を計算できるようにした。

本研究で採用した地球統計学的手法により、測定データが存在しない空間にも特性値を配置したモデル空間を構築することができた。このモデル空間は単なる線形補間ではなく、距離が近ければそれだけ測定点における特性値の影響が出やすくなるものである。このことより、単にランダムに特性値を配置した三次元空間分布モデルよりも実際の現場に近い三次元空間分布モデルを作成することが可能となった。

この地球統計学的手法を用いて作成した三次元空間モデルを用いて三次元飽和定常浸透流解析および粒子追跡法による到達時間の計算を実施した。三次元飽和定常浸透流解析によりモデル空間の横断面を通過する流量を算出し、この流量を断面積で除した値をマクロ透水係数として施工後の土構造物の透水性を評価する性能値として定義した。粒子追跡法による到達時間の計算結果のうち、特に最短の到達時間と管理型処分施設の管理期間の目安となる300年を比較し到達時間を観点として透水性能を評価した。

マクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の結果は、本研究で採取した施工後の

ベントナイト混合率・含水比・乾燥密度の平均値・ばらつきの程度であれば、構造物全体としての透水性能は要求性能を満足するものであると評価できた。

本章で示した数値解析によるマクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の評価手法を用いて、透水係数のばらつきの許容限界について評価を行った。その結果、施工時の管理目標値として、要求性能を満たす目標の値（本研究では透水係数： $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ ）よりも 0.70σ （ σ は標準偏差）程度大きい値を平均値とすればよいことが分かった。これは、標準偏差 σ が小さければ施工時の管理目標値を小さくしても、マクロ透水係数や粒子追跡法による到達時間で評価した場合、構造物全体としての透水性能を満足できることを意味するものである。

この成果を一般化すると、対数透水係数の平均値と目標値の距離を標準偏差に対する倍数 $n \times \sigma$ として管理することで、施工時の管理目標としての分布幅の設定が可能となるといえる。また、対数透水係数の平均値が当初計画よりも小さい場合でも、対数透水係数の平均値と目標値の距離 $n \times \sigma$ を確認することで、要求性能を満足しているかの確認ができるといえる。

さらに、施工に起因するばらつきが対数透水係数の標準偏差 σ として表現できる場合、対数透水係数の目標値に対数透水係数の平均値と目標値の距離 $n \times \sigma$ を加えた対数透水係数の平均値を施工目標値として設定することが可能となる。

次に、本章で示した数値解析によるマクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の評価手法に対する施工時の測定頻度の影響について、測定点の間隔を広く取った場合の数値計算上の実験を通じて評価した。その結果、本解析手法および入力データセットの範囲であれば、測定頻度を小さくしても、すなわち測定間隔を広く取っても（ $1\text{m}^2/\text{点} \Rightarrow 10\text{m}^2/\text{点}$ ）有意な影響は認められないことが分かった。

最後に、含水比および混合率のばらつきの影響を評価することにより、材料製造時のベントナイト混合土の含水比・混合率のばらつきの許容限界を確認した。その結果、含水比・混合率ともに設定値 $\pm 3.0\%$ 以内（本研究の場合、含水比： $19.0 \pm 3.0\%$ 、混合率： $30.0 \pm 3.0\%$ ）であれば、施工後の構造物全体での透水性能への影響は少ないことがわかった。この結果より、材料の練り混ぜ製造時の管理目標として設定値 $\pm 3.0\%$ 以内という値が採択できると考えられる。

第5章 参考文献

-
- 1) 田中幸久, 中村邦彦, 工藤康二, 廣永道彦, 仲神元順, 庭瀬一仁, 小松進一: 地盤統計学的手法により不均一性を考慮した締固めたベントナイト地盤の透水性評価, 土木学会論文集 C Vol.63 No.1, pp.207-223, 2007.2.
 - 2) 例えば, Hans Wackernagel 原著, 地球統計学研究委員会 訳著, 青木謙治 監訳: 地球統計学, 森北出版, pp.8-100, 2003.5.
 - 3) 間瀬茂: 地球統計学とクリギング法 R と geoR によるデータ解析, オーム社, pp.17-32
 - 4) 間瀬茂: 地球統計学とクリギング法 R と geoR によるデータ解析, オーム社, pp.84-

100

- 5) 西垣誠：誌面講座 地下水数値計算法(13)2-4.物質輸送のその他の解析法—オイリアン—ラグランジアン法(EL法)—, 地下水学会誌, 第33巻, 第4号, pp.265~276, 1991.
- 6) 靱井和朗：誌面講座 地下水数値計算法(11)2-2.差分法と特性曲線法による物質輸送解析の応用, 地下水学会誌, 第33巻, 第3号, pp.177-184, 1991.
- 7) 河野伊一郎, 西垣誠, 田中慎一:飽和・不飽和浸透流における非定常塩水化現象の有限要素法, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.133-141,1983.
- 8) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎:飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144, 1995.
- 9) Nahum, A. and Seifert, A.: Technique for backward particle tracking in the flow field, *Phys. Rev. E*, 74, 016701, 2006.
- 10) 山田淳夫, 千々松正和, 藤原斉郁, 矢田勤, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦:放射性廃棄物の地下空洞処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.3, pp.147-162, 2015.
- 11) 山田淳夫, 千々松正和, 藤原斉郁, 小峯秀雄, 飯塚敦:放射性廃棄物の地下空洞処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.3, pp.167-178, 2016.
- 12) 工藤淳, 庭瀬一仁, 矢込吉則, 河原忠弘, 千々松正和, 木村誠:低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工性試験, 土木学会第68回年次学術講演会, CS11-018, pp.35-36, 2013.

第6章
測定方法と解析手法との
組合せによる
品質管理方法の提案

6.1 提案する品質管理方法の概要

本研究で示した品質管理方法は、現場での測定結果を透水係数の代替指標として透水係数を換算し、換算した透水係数をクリギング手法と三次元飽和定常浸透流解析を組み合わせた解析手法を用いて、土構造物全体での透水性を評価するというものである。

透水係数と代替指標の相関性に関する評価は4章で示した。透水係数の代替指標として、現場で測定できる項目の一つに乾燥密度が挙げられる。乾燥密度の測定方法は従来のコアカッター法と3章で示した見かけの層厚変化と敷均し後のかさ密度から換算する方法（3Dスキャナによる方法）を用いる。この方法は、2章で示した中深度処分における低透水層の締固め施工においても、出来形管理の一環として3Dスキャナによる高さ測定を行えば適用できる方法であるが、本章では、コアカッター法と3Dスキャナのデータの両方が揃っている3章で示した浅地中ピット処分の施工結果を例として検討を進める。

5章で示した換算した透水係数をクリギング手法と三次元飽和定常浸透流解析を組み合わせた解析手法による試験施工後の土構造物残体での透水性（マクロ透水係数）の評価結果は、3章で示した3Dスキャナによる方法で得られた乾燥密度をもとに換算した透水係数を入力値としても透水性に関する要求性能を満足すること、測定頻度が計算結果に与える影響は、推定精度は若干低くなるものの、小さいことの2つの結果を含むものであった。

以上の結果より、本研究では、現場での乾燥密度の測定は非破壊で測定スピードも高い、3Dスキャナによる方法を主に、この測定法と解析手法との組み合わせによるものを提案する。3Dスキャナによる方法は、コアカッター法との測定値の比較より、見かけの層厚変化と密度変化率との間の相関式を作成する必要がある。

そのため、本章では見かけの層厚変化と密度変化率との間の回帰直線を作成する際の、コアカッター法の測定点数（データの母数）が与える相関式の推定精度（相関式から得られた乾燥密度のばらつき程度）への影響をまず評価する。次にコアカッター法の測定点数の影響を受けた相関式より算出した乾燥密度を用いた場合の、解析に入力する透水係数のばらつき、解析後のマクロ透水係数等への影響を評価する。

最後に、評価結果を受け、3Dスキャナによる方法を主体とした現場での乾燥密度等の測定方法、および測定データを用いて実施する施工後の土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案を、中深度処分および浅地中ピット処分のそれぞれについて示す。

6.2 見かけの層厚変化から乾燥密度を換算する回帰直線に与えるコアカッター法のデータ数の影響

6.2.1 コアカッター法のデータ数を変えて作成した回帰直線

図 6.2-1～図 6.2-5 にデータ数を変えて取得した見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する回帰直線を求めるグラフを示す。データ数が少なくなると、相関式の決定係数 R^2 は大きくなる傾向を見せる。ただし、データ数が少なくなると、決定係数は抽出した測定値によ

る影響が大きくなると考えられ、データ数が20点の時には一旦 $R^2=0.8829$ に小さくなっている。データ数が10点と再び少なくなると、抽出したデータの揃い方が偶然良かったのか、決定係数は再び $R^2=0.9421$ まで大きくなっている。

次に、回帰直線の95%信頼区間とデータの母集団の95%信頼区間に着目する。回帰直線の95%信頼区間は回帰直線の尤度を示し、幅が狭いほど尤度が高く推定の精度が高いといえる。データの母集団の95%信頼区間はデータセットから推定される母集団のばらつきの程度を表す。この幅が狭いほど母集団として推定されるデータセットのばらつきも狭く、データ数が多いほど母集団に近づくため、プロットした点のばらつき幅とデータのばらつきの95%信頼区間との乖離が小さくなる。これは、相関式の推定値の尤度は決定係数が大きければ良いというものでもないということを示す。

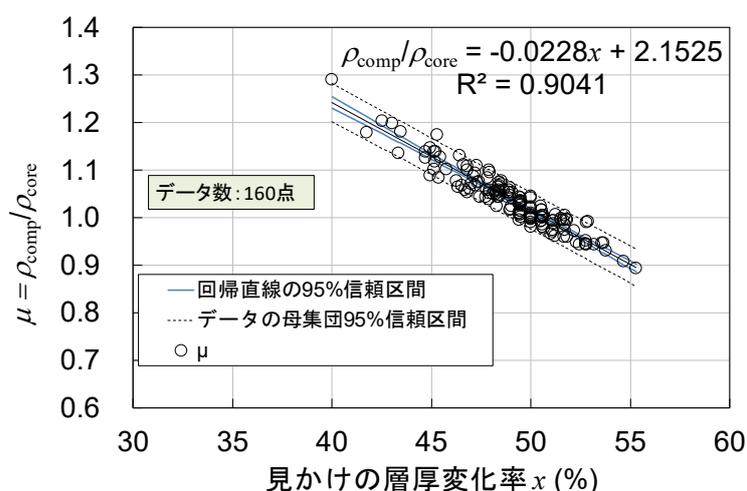


図 6.2-1 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ母数 160 点)

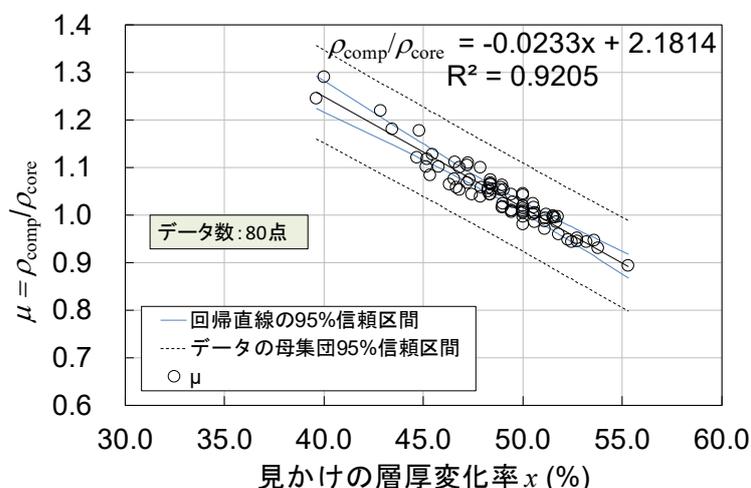


図 6.2-2 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ母数 80 点)

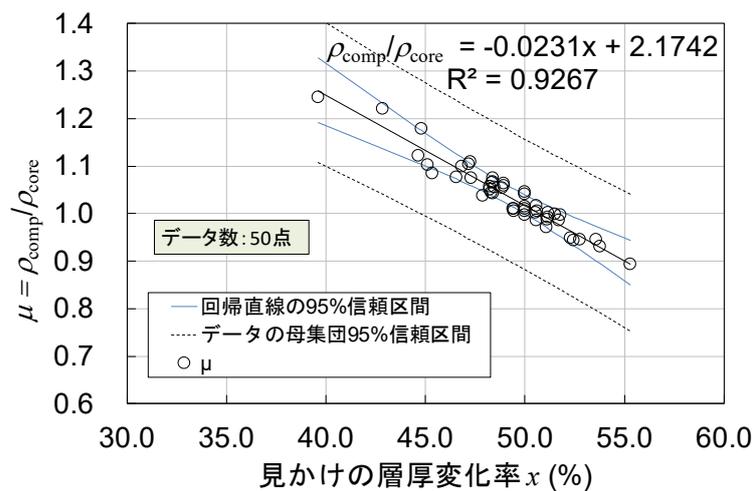


図 6.2-3 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ母数 50 点)

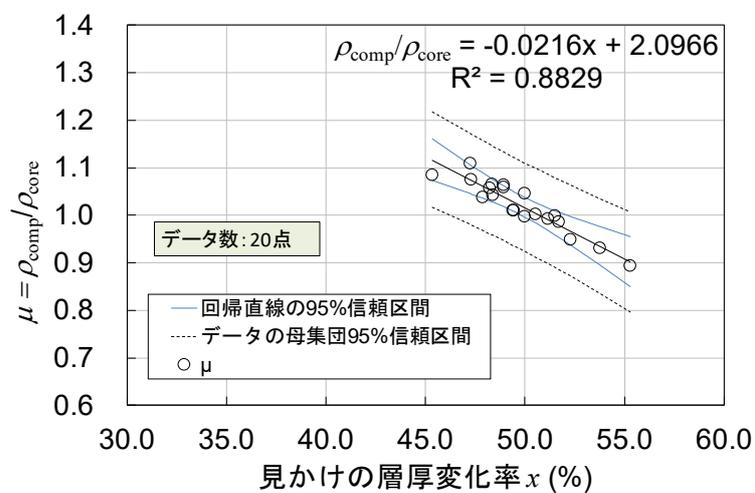


図 6.2-4 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ母数 20 点)

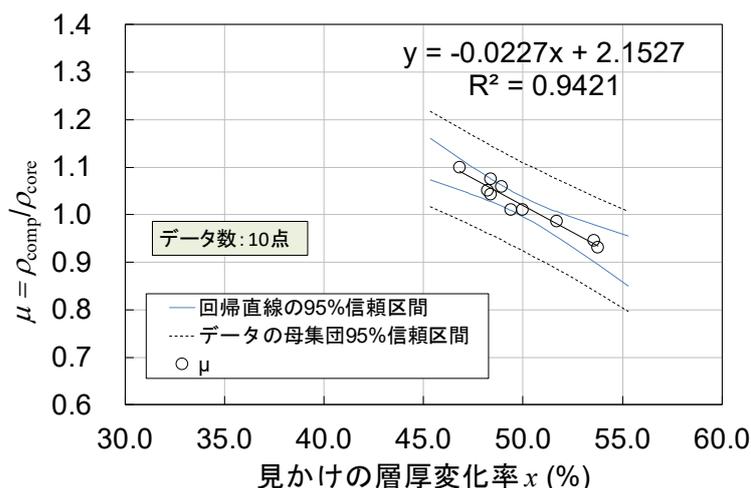


図 6.2-5 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ母数 10 点)

ここで、各データ数で作成した回帰直線を用いて乾燥密度を求める時のばらつきを、回帰直線の 95%信頼区間の上限値と下限値の間でばらつくものとして、3D スキャナによる方法で算出した乾燥密度のばらつきを評価する。回帰直線の 95%信頼区間の上限値と下限値に接する直線のうち、傾きが最大と最小になるものを抽出し、図 6.2-1～図 6.2-5 に追記したものを図 6.2-6～図 6.2-10 に示す。図 6.2-6～図 6.2-10 には、密度変化率 μ のプロットとデータの母集団の 95%信頼区間は傾きが最大と最小となる回帰直線 (図中の赤線と黒線) が見にくくなるため省略した。データ母数が少なくなるに伴い傾きが最大・最小になる直線の乖離幅が大きくなっている。

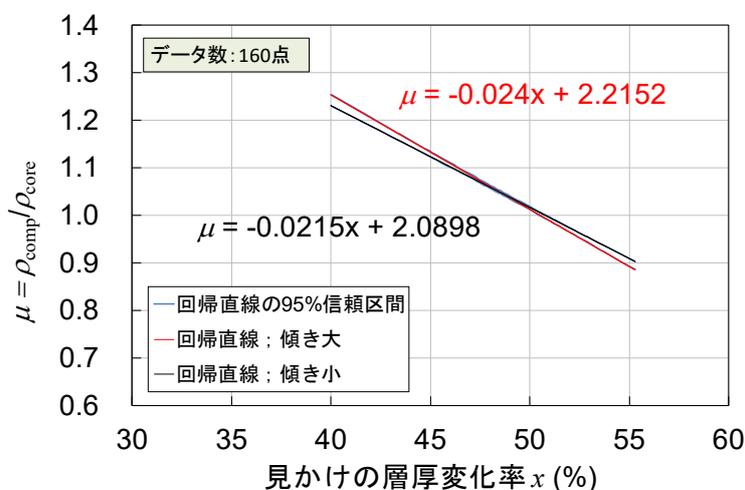


図 6.2-6 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ数 160 点)

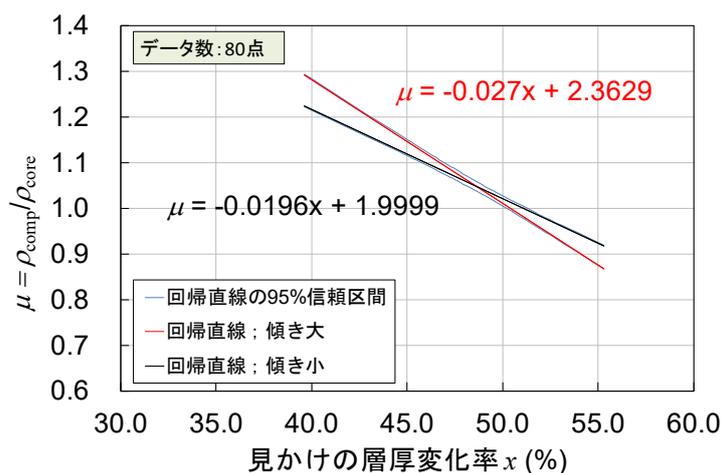


図 6.2-7 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ数 80 点)

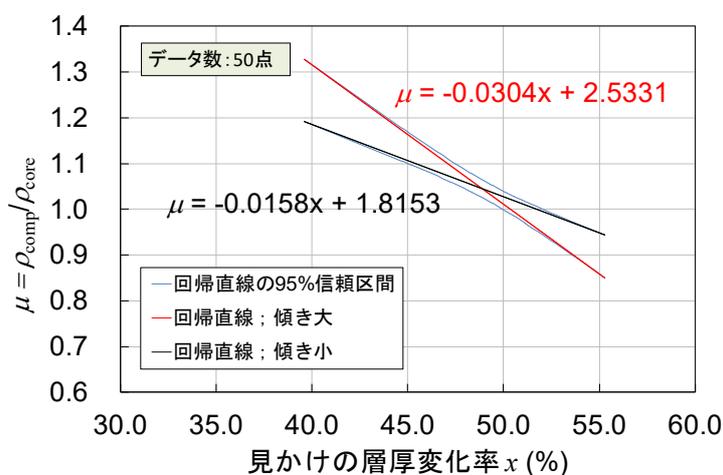


図 6.2-8 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ数 50 点)

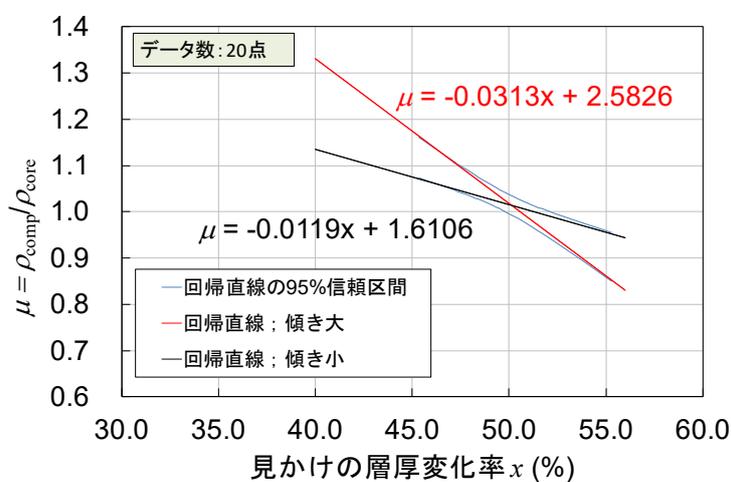


図 6.2-9 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ数 20 点)

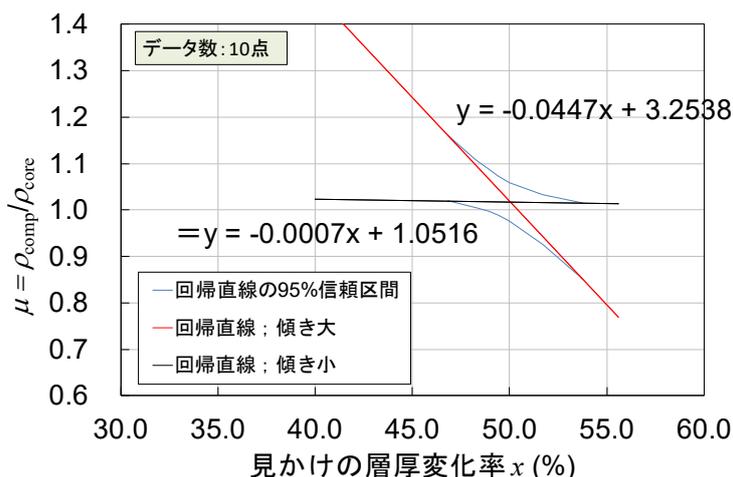


図 6.2-10 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定する相関式 (データ数 10 点)

6.2.2 コアカッター法の測定頻度を変えて作成した回帰直線を用いた乾燥密度の算定

最小二乗法・傾きが最大・傾きが最小の回帰直線 3 本を用いて乾燥密度を算定した。乾燥密度の算定は、回帰直線 1 本につき 500 点、計 1500 点の算定を行った。乾燥密度の算定は図 6.2-6～図 6.2-10 に示した回帰直線のパラメータを数式 3.3-6 に代入して行った。

乾燥密度の算定結果を図 6.2-11～図 6.2-15 に示す。データ数 160 点、80 点から推定した回帰直線を用いた場合、ばらつきの程度は大きく変わらず、分布幅が大きく広がっていない。また、標準偏差も 0.035 と 0.037 と有意な差は見られない。データ数 50 点になると、若干分布幅が広がり、標準偏差も 0.045 と若干大きくなっている。データ数 20 点、10 点になると分布幅がさらに広がり、データ数 160 点～50 点との有意な差が認められる。標準偏差もそれぞれ 0.056, 0.104 と大きくなっている。特にデータ数 10 点の場合は分布幅が大きく、現実的ではない結果となった。

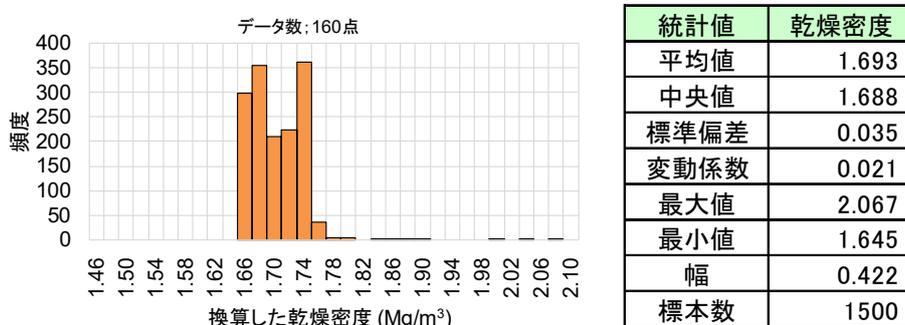
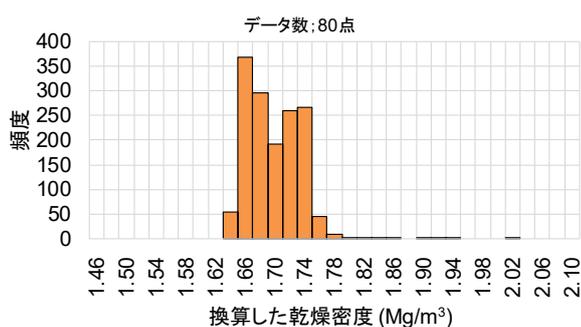
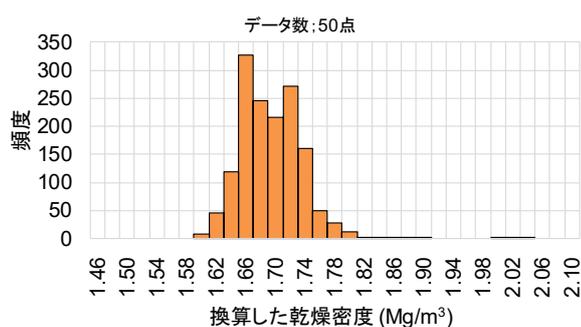


図 6.2-11 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定した結果 (データ数 160 点の相関式)



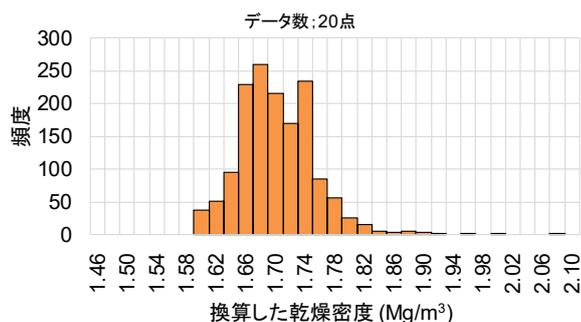
統計値	乾燥密度
平均値	1.689
中央値	1.684
標準偏差	0.037
変動係数	0.022
最大値	2.121
最小値	1.627
幅	0.494
標本数	1500

図 6.2-12 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定した結果（データ数 80 点の相関式）



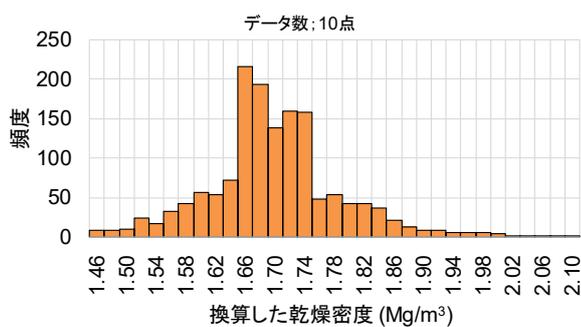
統計値	乾燥密度
平均値	1.685
中央値	1.681
標準偏差	0.045
変動係数	0.027
最大値	2.246
最小値	1.595
幅	0.651
標本数	1500

図 6.2-13 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定した結果（データ数 50 点の相関式）



統計値	乾燥密度
平均値	1.693
中央値	1.686
標準偏差	0.056
変動係数	0.033
最大値	2.419
最小値	1.580
幅	0.839
標本数	1500

図 6.2-14 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定した結果（データ数 20 点の相関式）



統計値	乾燥密度
平均値	1.693
中央値	1.681
標準偏差	0.104
変動係数	0.062
最大値	3.020
最小値	1.432
幅	1.588
標本数	1500

図 6.2-15 見かけの層厚変化から乾燥密度を推定した結果（データ数 10 点の相関式）

6.2.3 異なる回帰直線を用いた場合のクリギング後の対数透水係数への影響評価

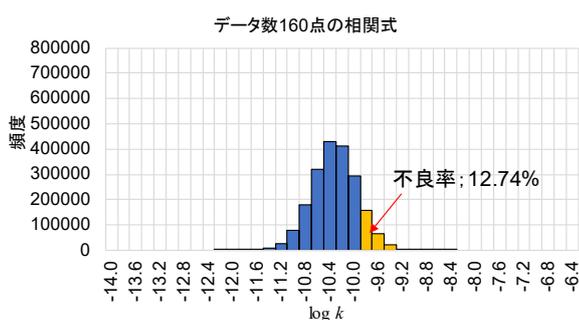
次に、図 6.2-11～図 6.2-14 に示した乾燥密度を用いて、図 4.6-1 のフローに従い数式 4.5-2 より透水係数を換算し、クリギングおよび条件付きシミュレーションを実施した。試験ケース名とパラメータの入力値の一覧表を表 6.2-1 に示す。

クリギングおよび条件付きシミュレーションの解析結果を図 6.2-16～図 6.2-19 に示す。回帰直線推定時のデータ数が少なくなるに伴い、対数透水係数の分布幅が大きくなる傾向がみられた。また、データ数 80 点と 50 点は不良率・標準偏差で大きな差異が認められず、分布幅のみデータ数が 50 点の場合の方が大きくなっている。データ数が 20 点まで少なくなると、不良率は 25%を超過した。

4 章で示したように、対数透水係数の平均値と目標値との差を 0.70σ 以上とすれば、求められる機能としての低透水性を発揮できるのであるが、逆に対数透水係数の平均値と目標値との差が 0.70σ 未満であれば要求される低透水性は期待できないと考えられる。

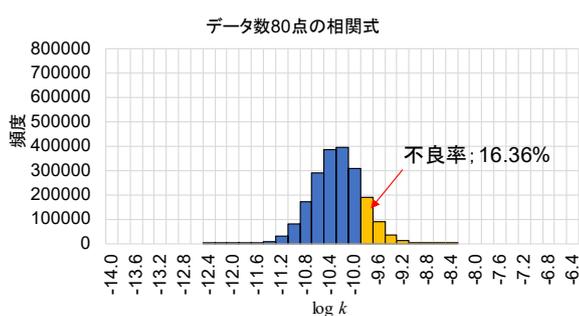
表 6.2-1 解析ケースと入力値一覧表（測定頻度の設定検討）

ケース名	条件	対数 透水係数 平均値	分散	シル	レンジ (x 方向)	レンジ (y 方向)
Case5-1	回帰直線推定時の データ数 160 点	-10.418	0.1945	0.05	0.42	1.8
Case5-2	回帰直線推定時の データ数 80 点	-10.356	0.2268	0.05	0.42	1.8
Case5-3	回帰直線推定時の データ数 50 点	-10.310	0.3443	0.05	0.42	1.8
Case5-4	回帰直線推定時の データ数 20 点	-10.337	0.5863	0.05	0.42	1.8



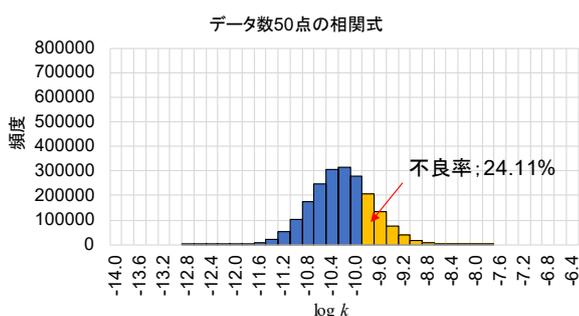
統計値	log k
平均値	-10.415
中央値	-10.417
標準偏差	0.368
変動係数	-0.035
最大値	-8.483
最小値	-12.243
幅	3.760
標本数	200000

図 6.2-16 条件付きシミュレーション後の透水係数の分布 (データ数 160 点の相関式)



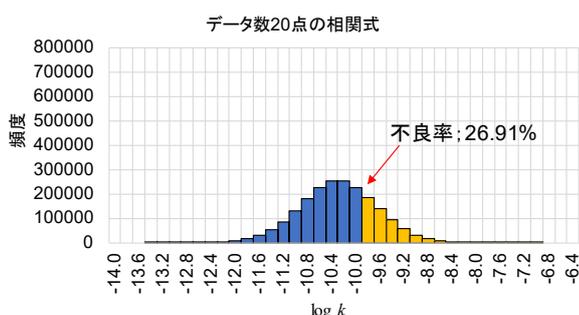
統計値	log k
平均値	-10.387
中央値	-10.386
標準偏差	0.398
変動係数	-0.038
最大値	-8.428
最小値	-12.502
幅	4.073
標本数	200000

図 6.2-17 条件付きシミュレーション後の透水係数の分布 (データ数 80 点の相関式)



統計値	log k
平均値	-10.351
中央値	-10.353
標準偏差	0.505
変動係数	-0.049
最大値	-7.850
最小値	-12.962
幅	5.112
標本数	200000

図 6.2-18 条件付きシミュレーション後の透水係数の分布 (データ数 50 点の相関式)



統計値	log k
平均値	-10.382
中央値	-10.384
標準偏差	0.633
変動係数	-0.061
最大値	-7.114
最小値	-13.547
幅	6.433
標本数	200000

図 6.2-19 条件付きシミュレーション後の透水係数の分布 (データ数 20 点の相関式)

表 6.2-2 に対数透水性係数の平均値・目標値・標準偏差の関係（回帰直線推定時のデータ数の影響確認）を示す。回帰直線推定時のデータ点数が 50 点と 20 点を境に対数透水性係数の平均値と目標値との差が 0.70σ をまたぐことを確認できた。この二つのケースについて三次元飽和定常浸透流解析を実施しマクロ透水性係数等を確認した。

表 6.2-2 透水性係数の平均値・目標値・標準偏差の関係
(回帰直線推定時のデータ数の影響)

ケース名	回帰直線推定時のデータ点数	対数透水性係数 (log k)					不良率 (%)
		最大値	最小値	平均値	標準偏差 σ	logk= -10 と平均値の差	
Case5-1	160 点	-8.5	-12.2	-10.42	0.368	1.13 σ	12.7
Case5-2	80 点	-8.4	-12.5	-10.39	0.398	0.97 σ	16.4
Case5-3	50 点	-7.8	-13.0	-10.35	0.505	0.70 σ	24.1
Case5-4	20 点	-7.1	-13.5	-10.38	0.633	0.60 σ	26.9

6.2.4 三次元飽和定常浸透流解析への影響評価

回帰直線推定時のデータ数を 50 点と 20 点とした場合の Case5-3 および Case5-4 について、三次元飽和定常浸透流解析を実施した。

Case5-3 および Case5-4 の 3 軸方向流れにおけるマクロ透水性係数の結果を図 6.2-20、図 6.2-21 に示す。いずれのケースでも Case1-1 や Case1-2 のように、x 軸方向流れと y 軸方向流れが同程度であり、若干 y 軸方向のマクロ透水性係数が小さくなった。また、z 軸方向流れのマクロ透水性係数が小さくなる傾向が見られた。

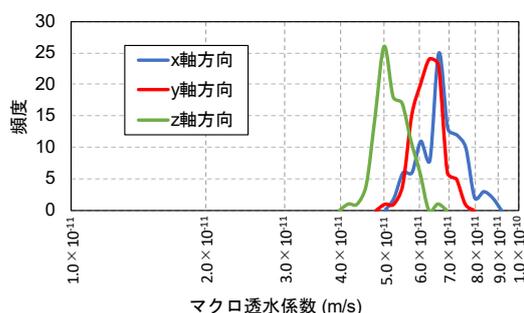


図 6.2-20 三軸方向のマクロ透水性係数 (Case5-3)

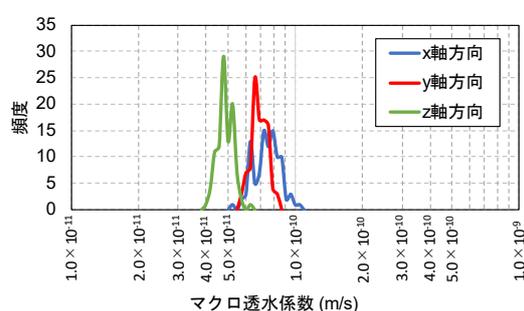


図 6.2-21 三軸方向のマクロ透水性係数 (Case5-4)

Case1-1, Case1-2 および Case5-3, Case5-4 マクロ透水性係数の比較結果を図 6.2-22～図 6.2-24 に、粒子追跡法による到達時間の最小値を図 6.2-25 に示す。5 章の知見の通り、対数透水性係数の平均値と目標値との差が 0.70σ を下回る Case5-4 は、マクロ透水性係数（対数表記）が -10.00 を上回る場合が発生した。到達時間の平均値は Case5-3 よりも Case5-4 の方が分布幅は大きくなる傾向を示した。Case5-4 では、到達時間の最小値が 300 年を下回っ

た.

3章および5章で示したように、施工後の透水係数から判断すると、本研究による方法で施工した限りにおいては、マクロ透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ (対数で-10.00) を満足するはずである。そのため、本節の検討結果よりマクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ (対数で-10.00) を上回るような解析結果が生じないことを条件として考慮すると、回帰直線推定時のデータ数は最低50点以上必要であると判断できる。

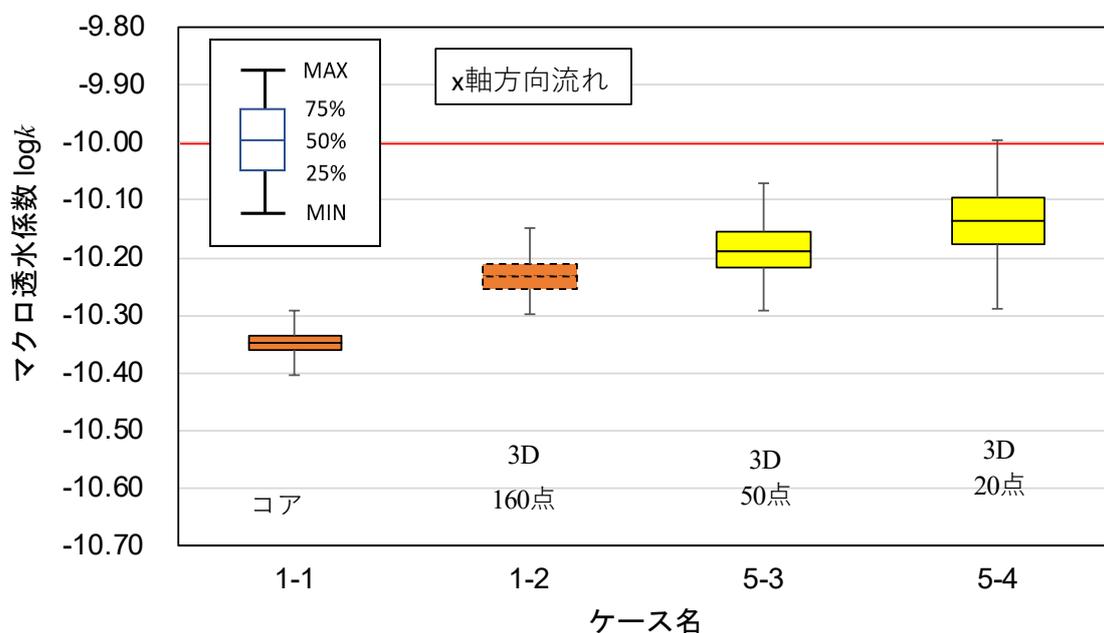


図 6.2-22 マクロ透水係数の計算結果 (Case5-3, Case5-4, x 軸方向流れ)

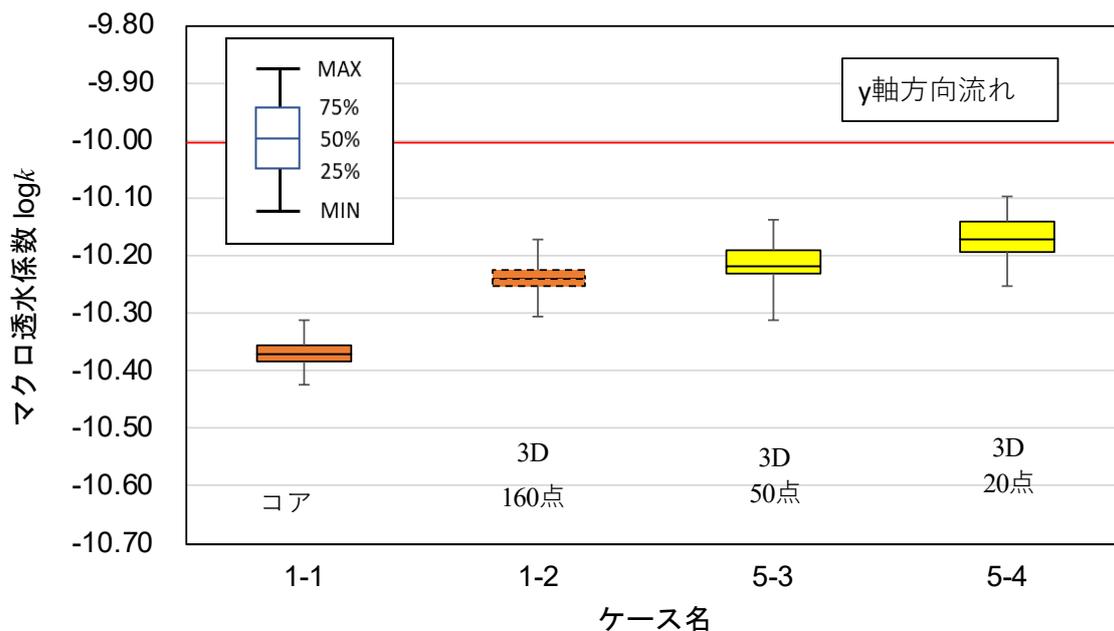


図 6.2-23 マクロ透水係数の計算結果 (Case5-3, Case5-4, y 軸方向流れ)

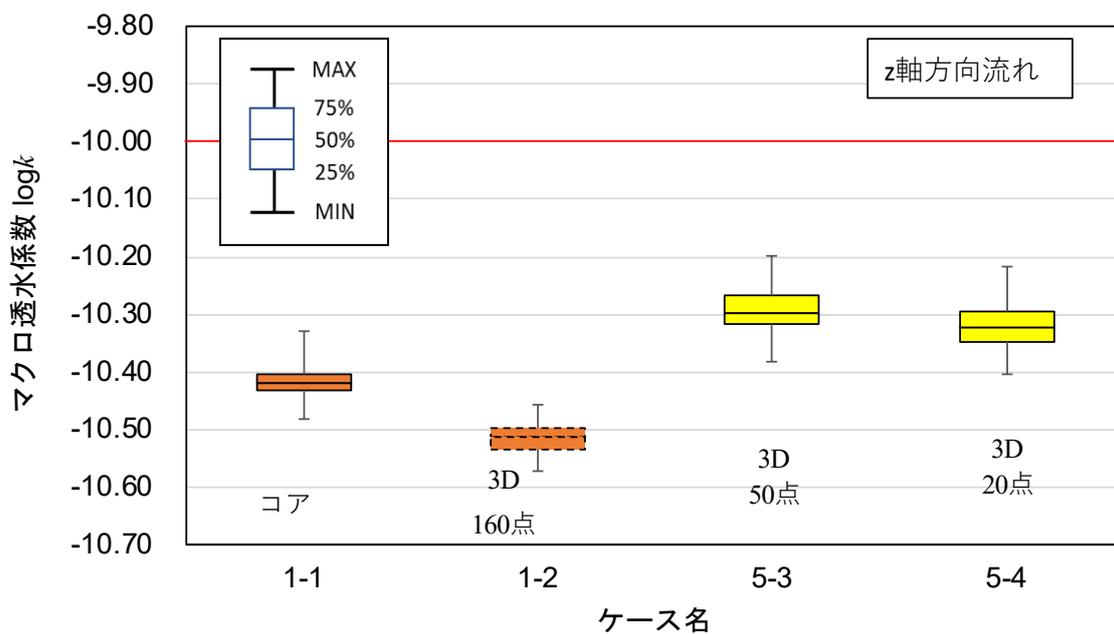


図 6.2-24 マクロ透水係数の計算結果 (Case5-3, Case5-4, z 軸方向流れ)

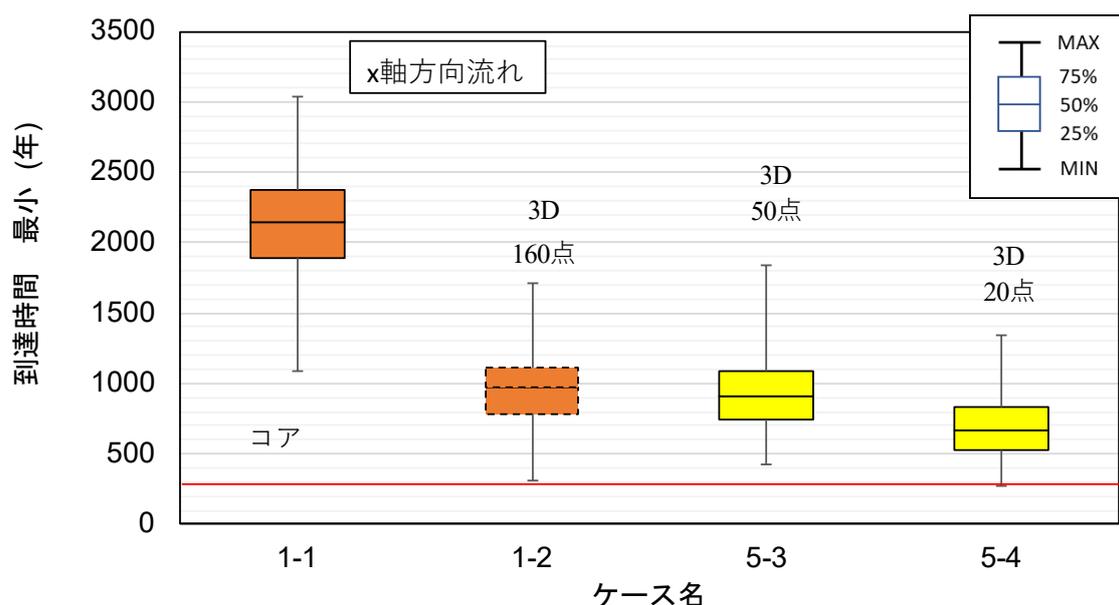


図 6.2-25 到達時間（最小値）（Case5-3, Case5-4, x 軸方向流れ）

6.3 3D スキャナによる方法および施工後土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案

6.3.1 提案する方法の概要

3D スキャナによる方法による乾燥密度の算定値の精度は、見かけの層厚変化から乾燥密度を換算する回帰直線の精度に影響を受ける。本章では、この回帰直線を作成するために必要なコアカッター法のデータ数に関する検討を行った。コアカッター法のデータ数を変えて作成した場合の乾燥密度のばらつきの影響評価を、施工後土構造物の透水性を評価する解析を通して行った。その結果、回帰直線の作成には最低 50 点のデータが必要であることを示した。

また、5 章の 5.4 節において測定頻度が少なくなっても、施工後土構造物の透水性評価解析によるマクロ透水係数への影響は少ないことを示した。

本節では、これらの知見をもとに、工法規定方式を基にした施工管理方法を提案する。すなわち、現場密度試験の一つであるコアカッター法の測定頻度を極力減らすための測定頻度についてまとめる。これは、3D スキャナによる方法との組み合わせた場合の測定箇所配置について検討するものである。

最後に、配合設定時や、現場での測定項目と測定結果を用いた透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法に関する提案を行う。

6.3.2 現場での乾燥密度の測定箇所の配置例

幅 2m, 延長 40m, 高さ 5m の施工箇所を想定する。1 層当たり 50mm 程度ずつ高さが上がる施工を繰り返すとすると、施工層数は 100 層となる。100 層を繰り返し施工する時

に全ての乾燥密度の測定をコアカッター法で実施する事は合理的ではない。しかしながら1層目から3D スキャナによる方法を適用することは、回帰直線を作成する必要があるため不可能である。

そこで、本施工に移る前に試験盛土時点でデータベースを構築することを提案する。この時、50点以上のコアカッター法による現場密度試験と、3D スキャナによる測量を行い3D スキャナによる方法に用いる回帰直線を作成するとともに、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを算定しておく。さらに、施工機械・敷均し厚さ・転圧回数を規定し、工法規定方式による施工管理に資するデータを採取する。

この試験盛土のデータベースを用いることによって本施工時の累計の施工層数が少ない段階でも施工後の低透水層の透水性能を地球統計学的手法による解析によって評価できる。施工段階が進み施工層数が多くなるにつれて現場の施工データが拡充されるのでこのデータベースを適宜更新し、3D スキャナによる方法に用いる回帰直線や、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを更新し解析の精度を向上させていくものとする。

図 6.3-1 に本施工時のコアカッター法の測定位置の配置例を示す。コアカッター法は、施工延長5mに1点程度、8点/層の測定頻度とした。3D スキャナによる方法は、10cm×10cmで施工面を区切り、各区画に5点以上のスキャニングデータが存在するように測定を行うものとする。そのための3D スキャナの配置の問題は、施工箇所の制約条件に大きく左右される施工計画上の問題であるので、本研究では言及しない。測定に有利になる3D スキャナの配置例を図 6.3-2 に示す。図 6.3-2 に示した事例²⁾は、仮設足場を設置し地上5mの高さから3D スキャナでの測定を実施したものである。照射したレーザーの入射角は最遠点の10m先において約26.5°である。施工延長を40mとした場合、その中間点である20m区間に3D スキャナを設置すれば、最遠点は20m程度となるのでその時の入射角は14°程度となる。図 6.3-2 の例ではスキャニングの頻度は最遠点で42点のスキャニングデータが存在するように測定しているが、この設定も施工箇所の制約条件に大きく左右される施工計画上の問題であるので、本研究では言及しない。

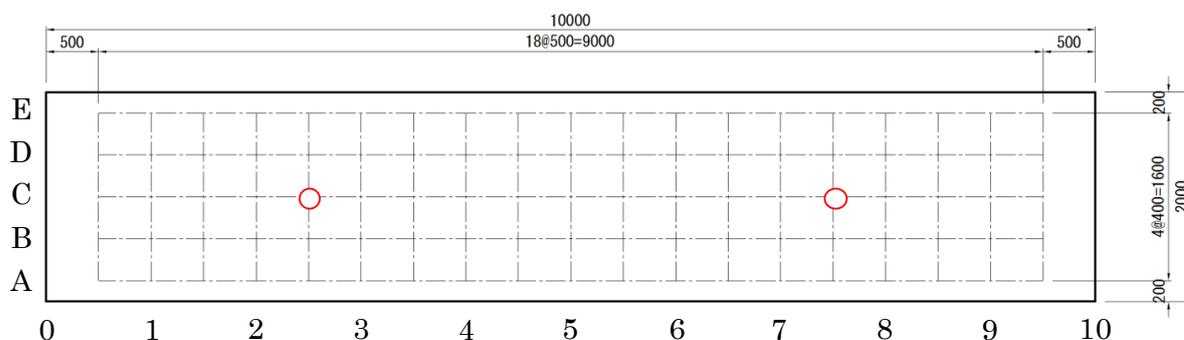


図 6.3-1 コアカッター法の測定位置の配置例

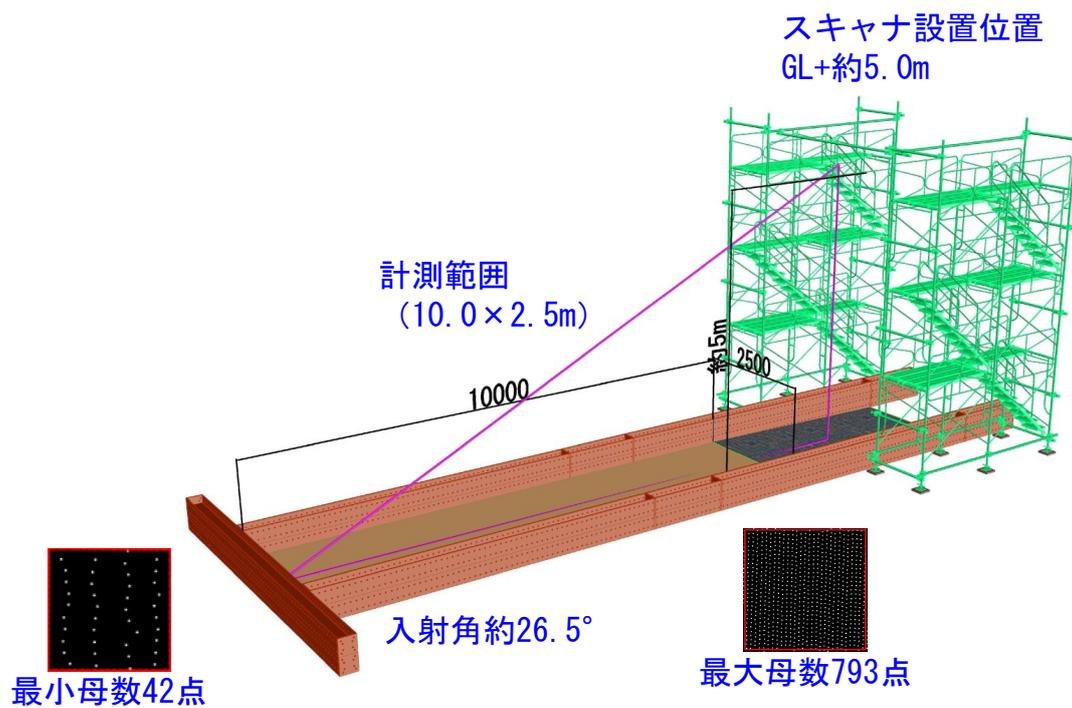


図 6.3-2 3D スキャナによる測量事例

6.3.3 材料納品時から施工時における測定項目

6.3.3.1 中深度処分の場合

4章で示した中深度処分における透水係数の主な代替指標は乾燥密度であった。乾燥密度以外にも、モンモリロナイト含有率や土粒子密度等、納品時に確認すべき物性値もある。大部分が4章で示した参考文献から引用できる物性値ではあるが、納品時、材料調整後、敷均し後、転圧後の各段階において測定すべき項目をまとめた。各段階での品質管理項目とその試験方法を表 6.3-1 に示す。

表 6.3-1 品質管理項目と測定方法

	品質管理項目	試験方法	基準類
材料納品時	モンモリロナイト含有率 C_m	メチレンブルー吸着量 (MBC) 測定 または ミルシート確認	JIS Z 2451 : 2019
	土粒子密度 ρ_b	土粒子密度測定	JIS A 1202 : 2009
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
施工管理 目標設計	締固め特性	締固め試験	JIS A 1210 : 2009, C 法
	透水係数	透水試験	JGS 0312-2018
材料製造	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
施工前	施工基面高さ z_1	レベル測量, 3D スキャナによる測量	
	施工幅・延長	測量, 3D スキャナによる測量	
材料の 敷均し	出来形管理		
	敷き均し後高さ z_2	3D スキャナによる測量	
	品質管理		
	湿潤密度	かさ密度測定	JGS 1613-2012 を参考
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	乾燥密度 ρ_{dr}	かさ密度測定	JGS 1613-2012 を参考
転圧	出来形管理		
	転圧後高さ z_3	レベル測量, 3D スキャナによる測量	
	施工幅・延長	測量, 3D スキャナによる測量	
	品質管理		
	湿潤密度	コアカッター法	JGS 1613-2012
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	乾燥密度 ρ_d	コアカッター法 3D スキャナによる方法	JGS 1613-2012 本研究
性能確認	透水係数 k	透水試験	JGS 0312-2018

6.3.3.2 浅地中ピット処分の場合

4章で提案した代替指標の算出に必要な「有効飽和度 S_r 」および代替指標である「有効飽和度 S_r' で正規化した吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' 」の算出には、乾燥密度以外にも測定する必要がある項目がある。ここでは、3章の品質測定項目を参照しつつ、現場で実施する測定項目を表 6.3-2 に再整理する。

材料の納品段階・配合設計段階においては、モンモリロナイト含有率を測定するメチレンブルー吸着量 (MBC) 測定や土粒子密度の測定、透水試験等の測定機器類が現場で確保できなかつたり手順が煩雑な試験を実施しなければならないので、現場での施工段階においてこれらの試験を実施しなくとも良いような項目を選定している。逆に施工段階における試験は、現場での測定も十分可能な質量測定を元にした土の密度試験、細粒分含有率試験、測量による高さ測定を主な項目としている。

表 6.3-2 品質管理項目案

	品質管理項目	試験方法	基準類
材料納品時	ベントナイト		
	モンモリロナイト含有率 C_m	メチレンブルー吸着量 (MBC) 測定 または、ミルシート確認	JIS Z 2451 : 2019
	土粒子密度 ρ_b	土粒子密度測定	JIS A 1202 : 2009
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	砂		
	土粒子密度 ρ_s	土粒子密度測定	JIS A 1202 : 2009
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	粒度分布	粒度分布測定	JIS A 1204 : 2009
	細粒分含有率	細粒分含有率測定	JIS A 1223 : 2009
配合設計	ベントナイト混合土		
	締固め特性	締固め試験	JIS A 1210 : 2009, C 法
	透水係数	透水試験	JGS 0312-2018
材料製造	ベントナイト混合率	細粒分含有率測定	JIS A 1223 : 2009
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
施工前	施工基面高さ z_1	レベル測量, 3D スキャナによる測量	
	施工幅・延長	測量, 3D スキャナによる測量	
材料の 敷均し	出来形管理		
	敷き均し後高さ z_2	3D スキャナによる測量	
	品質管理		
	湿潤密度	かさ密度測定	JGS 1613-2012 を参考
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	乾燥密度 ρ_{dr}	かさ密度測定	JGS 1613-2012 を参考
転圧	出来形管理		
	転圧後高さ z_3	レベル測量, 3D スキャナによる測量	
	施工幅・延長	測量, 3D スキャナによる測量	
	品質管理		
	湿潤密度	コアカッター法	JGS 1613-2012
	含水比	含水比測定	JIS A 1203 : 2009
	乾燥密度 ρ_d	コアカッター法 3D スキャナによる方法	JGS 1613-2012 本研究
性能確認	透水係数 k	透水試験	JGS 0312-2018

6.3.4 透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案

6.3.4.1 中深度処分の場合

表 6.3-1 の測定項目にならない、材料の納品段階から配合設計、転圧後の品質確認までの施工の各段階における測定項目・品質管理項目および構築した土構造物全体での性能ともいえるマクロ透水係数の算定までの流れを図 6.3-3 に示すフロー図として整理した。このフロー図の中には、本研究で提案する二つの品質管理方法に用いるためのデータを採取する流れが含まれている。

一つ目の提案方法は、3D スキャナによる測量結果のうち高さ測量の結果を活用し、転圧後の乾燥密度を数均し後のかさ密度 ρ_{d_r} と層厚変化率 x とから算定するものである。この方法は 3D スキャナによる方法として 3 章で紹介し、6.1 節で乾燥密度を算定するための回帰式作成時の精度に関する評価を行ったものである。

二つ目の提案方法は乾燥密度を代替指標として透水係数を推定する場合に必要な物性値を測定するものである。乾燥密度以外の測定項目が施工のどの段階で採取できるのかがわかるように示した。材料の納品時から転圧時にいたるまで、施工の各段階での測定すべき項目が存在するのがわかる。

最終的にクリギングによる透水係数の空間分布モデルの作成と合わせた三次元飽和定常浸透流により、構造物全体での性能ともいえるマクロ透水係数を算定するものとした。従来は施工後に採取した試料を用いた透水試験から得た透水係数のみで構造物全体の透水性を推定しなければならなかった。本研究での成果より、間接的とはいえ測定点の間の透水係数のデータが存在しない区間を補完し、構造物全体での透水性能を評価することが可能となった。

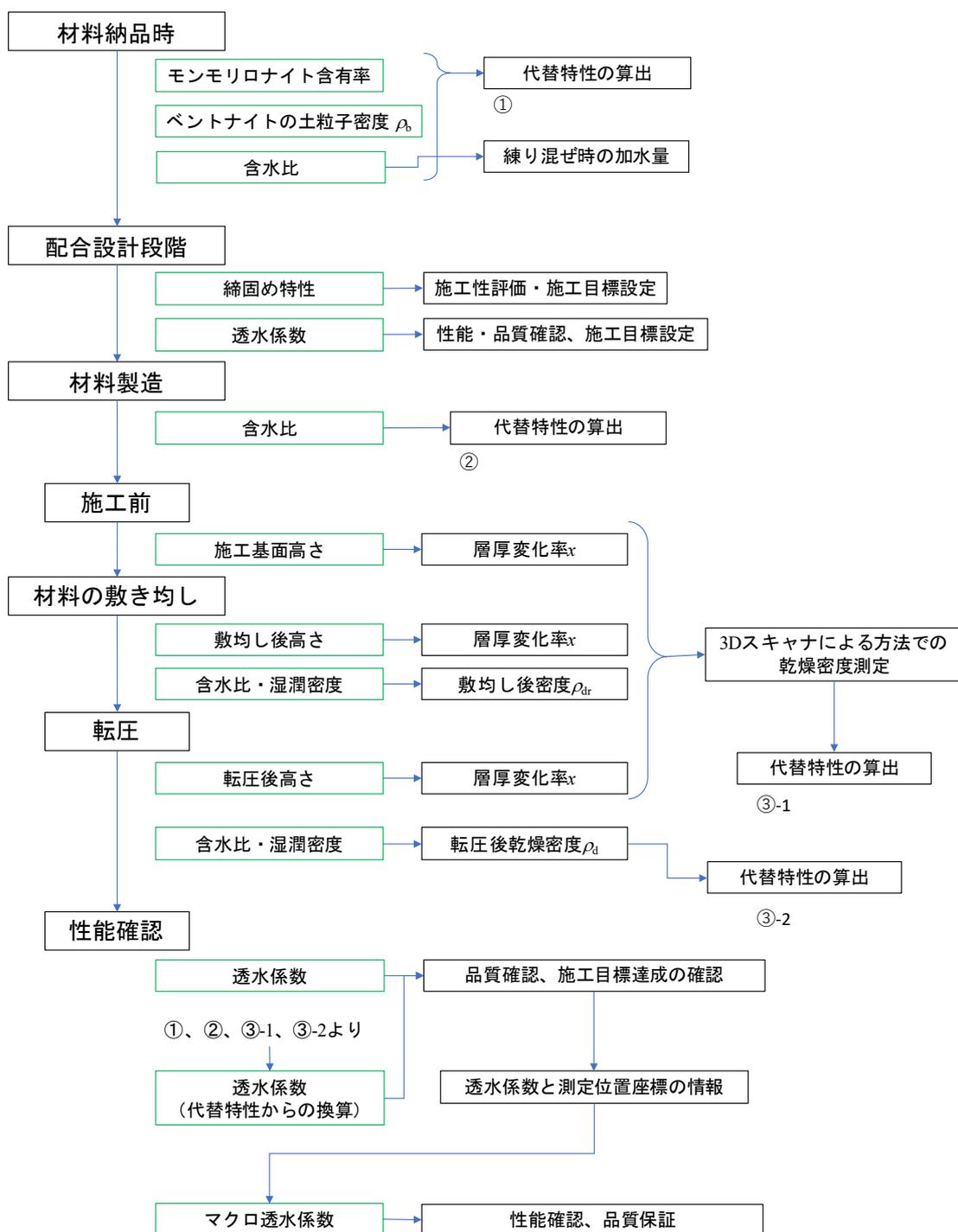


図 6.3-3 各施工段階における品質管理項目とその反映先に関するフロー図

6.3.4.2 浅地中ピット処分の場合

表 6.3-2 の測定項目にならない, 材料の納品段階から配合設計, 転圧後の品質確認までの施工の各段階における測定項目・品質管理項目および構築した土構造物全体での性能ともいえるマクロ透水係数の算定までの流れを図 6.3-4 に示すフロー図として整理した. このフロー図の中には, 本研究で提案する代替指標である「有効飽和度 S_r 」で正規化した吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} 」を算出するものである. 乾燥密度以外の測定項目が施工のどの段階で採取できるのかがわかるように示した. 材料の納品時から転圧時にいたるまで, 施工の各段階での測定すべき項目が存在するのがわかる.

最終的にクリギングによる透水係数の空間分布モデルの作成と合わせた三次元飽和定常浸透流により, 構造物全体での性能ともいえるマクロ透水係数を算定するのは中深度処分の場合と同様である.

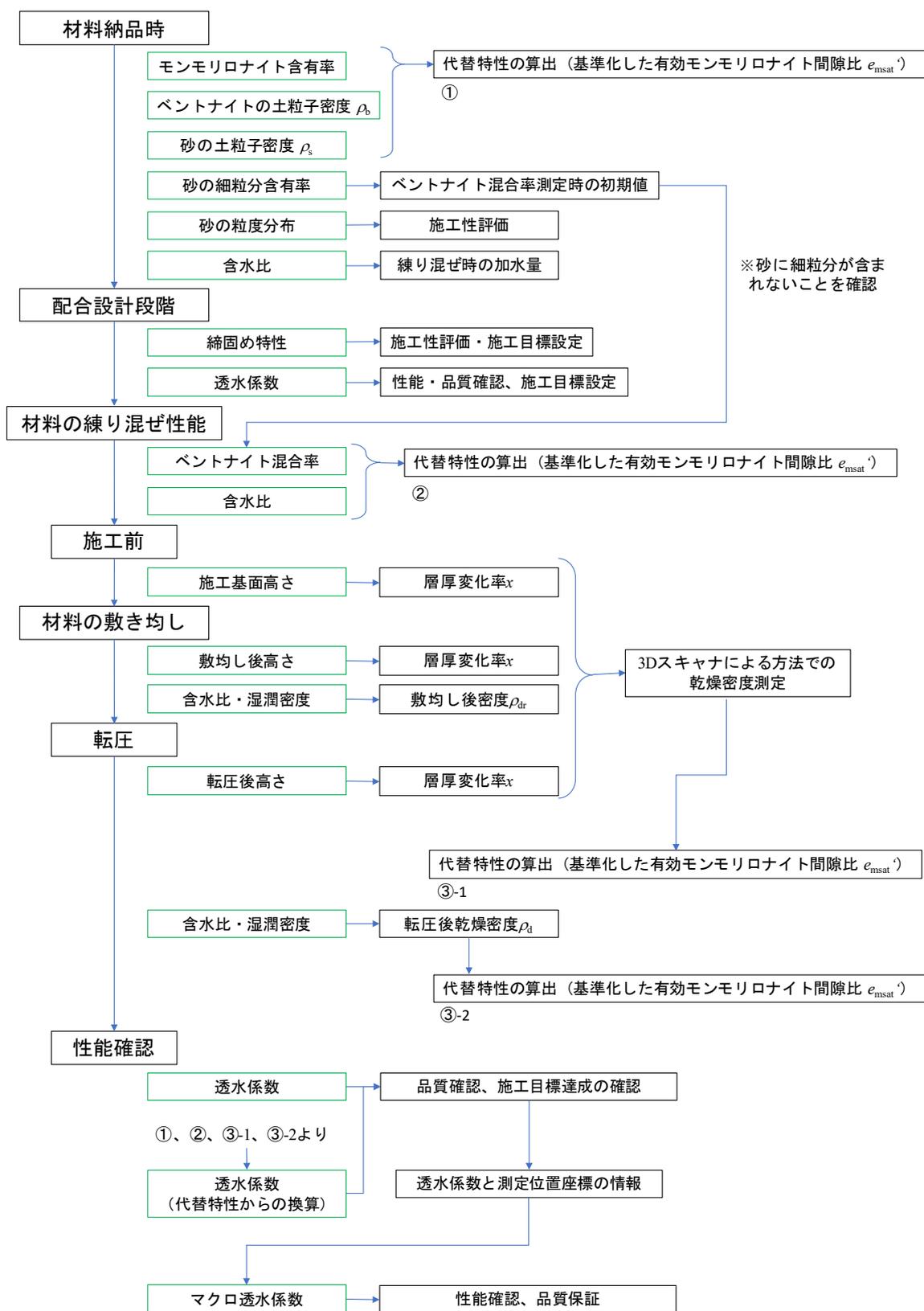


図 6.3-4 各施工段階における品質管理項目とその反映先に関するフロー図

6.4 6章のまとめ

本章では、現場での乾燥密度の測定は非破壊で測定スピードも高い、3D スキャナによる方法を主に、この測定法と解析手法との組み合わせによるものを提案した。ところが、3D スキャナによる方法は、コアカッター法との測定値の比較より、見かけの層厚変化と密度変化率との間の相関式（回帰直線）を作成する必要がある。

そのため、本章では見かけの層厚変化と密度変化率との間の相関式（回帰直線）を作成する際の、コアカッター法の測定点数（データの母数）が与える回帰直線の式の推定精度（回帰直線の式から得られた乾燥密度のばらつきの程度）への影響を評価した。次にコアカッター法の測定点数の影響を受けた回帰直線より算出した乾燥密度を用いた場合の、解析に入力する透水係数のばらつき、解析後のマクロ透水係数等への影響を評価した。

その結果、マクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ （対数で-10.00）を上回るような解析結果が生じないことを条件として考慮すると、回帰直線推定時のデータ数は最低 50 点以上が必要であることがわかった。

最後に、この評価結果を受け、3D スキャナによる方法を主体とした現場での乾燥密度等の測定方法、および測定データを用いて実施する施工後土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案を行った。これは、本施工に移る前に試験盛土時点でデータベースを構築し、50 点以上のコアカッター法による現場密度試験と、3D スキャナによる測量を行い 3D スキャナによる方法に用いる回帰直線を作成するとともに、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを算定しておくというものである。この試験盛土のデータベースを用いることによって本施工時の累計の施工層数が少ない段階でも施工後の低透水層の透水性能を地球統計学的手法による解析によって評価できる。施工段階が進み施工層数が多くなるにつれて現場の施工データが拡充されるのでこのデータベースを適宜更新し、3D スキャナによる方法に用いる回帰直線や、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを更新し解析の精度を向上させていくものとする。乾燥密度以外に必要なモンモリロナイト含有率、土粒子密度の測定や透水試験は現場ではない場所での測定を行う必要があるので、現場での施工段階とは異なる計画段階で室内試験の一環として取得することとした。

このような品質管理にかかる施工の各段階で実施項目を併記しながら施工の流れがわかるようなフロー図を作成することができた。

第6章 参考文献

- 1) 例えば、前園宣彦、概説 確率統計 第3版、サイエンス社。
- 2) 田島宏之、千々松正和、山田淳夫、荻原績：放射性は器物処分場における施工管理方法（その2. 3D レーザー測量による高さ管理）、土木学会第72回年次学術講演会概要集、VII-053, pp.105-106, 2017.9.

第 7 章

結論

7.1 結論

本研究は、低レベル放射性廃棄物処分場のベントナイト混合土の締固め施工時における品質管理方法（測定項目・測定方法・測定頻度）やこの品質管理方法で取得したデータセットを用いて施工後の構造物全体での品質を評価する方法（要求性能を満足しているのかの確認する方法）についてまとめ、施工段階の品質管理からトータルで品質保証を行う方法について提案することを目的とした。そのためには以下の2つの課題を解決する必要があった。

- ・ 施工に起因するばらつきを考慮した、施工目標値の設定の考え方をまとめる。
- ・ 施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめる。

これら二つの課題を解決するために行った研究成果を章ごとに以下のようにまとめる。

1章では、本研究の目的と研究の進め方、本論文の構成についてまとめた。

2章では、中深処分施設における人工バリアの一つである低透水層の施工方法と施工時の品質管理を定め、それらの方法で施工した後の品質測定結果についてまとめたものである。本章で得られた知見は以下のとおりである。

高密度な低透水層を構築できる材料として粉末ベントナイトより締固め性が高い粒状ベントナイトを用いて、極めて透水係数が小さい低透水層を構築できることを確認した。中深度処分の低透水層には極めて低い透水性が求められるため、できるだけ均質に締め固める必要があると考えた。そこで、アスファルト舗装に用いられる大型フィニッシャーを用いて敷均しに適用した。その結果、材料の敷均しにアスファルトフィニッシャーを適用して施工することが可能であることがわかった。また、敷均し後のかさ密度のばらつきの範囲は、 0.15 Mg/m^3 程度であった。

側部低透水層に関しては、さらに幅 1m ・高さ約 8m の狭隘なトレンチ状の、空間的に制限されている箇所にも適合した施工システムの検討も行った。アスファルトフィニッシャーの材料敷均し機構を取り入れた幅 1m の箇所でも敷均しができるベントナイト敷均し機、ピット上部からベントナイト敷均し機に材量を供給するベントナイト供給機を製作しこれらの適用性について施工試験を通して評価した。その結果、均一で平滑な敷均しを行うことができた。

底部の低透水層については、小型振動ローラ、大型振動ローラを組み合わせ高品質の低透水層の施工が可能であることを確認した。同一層内の鉛直方向に密度差があることを確認したが、乾燥密度は概ね管理目標値に収まることを確認した。平面位置によって異なる転圧条件の影響は、乾燥密度の分布として認められたが、分布幅が小さくほとんど影響しないことを確認した。敷均し時の密度のばらつきが転圧後の乾燥密度に与える影響も小さいことが分かった。

側部の低透水層については、転圧ローラの幅を変更した場合、敷均し厚さを変更した場合、同一条件で転圧した時の乾燥密度のばらつきの程度、平面位置の違い、のそれぞれの影響について確認した。転圧ローラの接地圧によって締固めエネルギーが到達する深さが変化することを確認できた。走行レーンを変えることにより壁際を含む横断方向にも満遍なく締固めエネルギーを与えられることも確認した。また、本研究で選択した施工方法では、締固めエネルギーは $4.5 E_c$ 相当 ($1 E_c \simeq 550 \text{ kJ/m}^3$) であると推定される。さらに、同一条件で施工を繰り返した結果、含水比調整、敷均し方法も含め、本研究で選択した施工方法によれば、転圧後の乾燥密度はある分布幅 (ばらつき) を持つが、施工管理目標の値の範囲内に収めることが可能であることがわかった。

実際に構築した低透水層から採取した試料を用いた特性確認試験を実施した。その結果、室内で圧縮成型された供試体を用いた既往知見の結果は、本研究で得られたデータと近い結果であることを確認した。そのため、これまでの室内試験で得られたデータも実建造物の設計・評価に用いることが可能であることがわかった。

以上の結果から、本研究で取り上げた施工方法の組み合わせ (ミキサー混合による含水比調整、アスファルトフィニッシャーによる敷均し、振動ローラによる現場締固め工法) により、中深度処分で計画されている地下環境においてベントナイトを用いた人工バリア (低透水層) に要求される水準の品質を満足する施工が可能であることを確認した。また、転圧機械と転圧幅・敷均し厚さ・転圧回数を規定して施工を複数層繰り返した結果、仕上がり密度のばらつきの程度を把握するとともに、要求性能を満足する施工が可能であることを確認できた。このことより、中深度処分施設における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能であることを確認できた。

3章では、施工試験に資する材料の配合設計の仕方および施工試験時の管理目標値の設定の仕方を説明し、暫定的ではあるものの施工時の管理目標を設定した。

設定した施工管理目標を満たすための施工方法、すなわち練り混ぜ方法・敷均し方法・転圧方法の概要、施工後の品質測定の測定方法についてまとめた。本研究での施工方法のうち、敷き均し方法はアスファルトフィニッシャーを用いる点で通常の土工事と大きく異なることが特徴である。アスファルトフィニッシャーを用いることで、敷均し後の材料の密度と厚さが均一にすることが可能となった。

このような施工方法で施工した結果は、各施工段階 (練り混ぜ後・敷均し後・転圧後) における品質測定での測定結果としてまとめた。練り混ぜ後の材料の含水比のばらつきは $19.0 \pm 1.0\%$ 以内、ベントナイトの混合率で $30.0 \pm 1.0\%$ 以内に収めることができ、均一な材料製造が可能であることが分かった。また、転圧後の乾燥密度は $1.69 \pm 0.05 \text{ Mg/m}^3$ と大きくばらつきのない構造物が施工できた。

施工時の品質管理の一方法として、3D スキャナのデータを用いた乾燥密度の測定方法の適用性をコアカッター法との測定結果の比較より行った。その結果、コアカッター法の測定結果と大きく異ならず、3D スキャナのデータを活用して乾燥密度の推定が精度よくできる

ことが分かった。

また、本研究の対象土構造物である浅地中ピット処分施設における低透水層の要求性能である透水性について、施工後に回収した試料を用いた透水試験の結果についてまとめた。その結果、透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ を全て満足しており、室内で圧縮成形した供試体を用いた結果よりも施工後回収した試料を用いた試験結果の方が透水係数は小さめとなった。これは、ベントナイトの生産ロットの違いにより、ベントナイト中のモンモリロナイト含有率 C_m が施工試験に用いたものの方が高かったこと（配合設定試験時： $C_m=78.9\%$ ，施工試験時： 87.9% ）が要因であると考えられる。

本研究での施工方法では、乾燥密度や含水比がどの程度のばらつきで施工できるのかが分かった。回収試料を用いた透水試験の結果より、要求性能を満足できることを確認できた。これらの結果より、転圧機械と転圧幅・敷均し厚さ・転圧回数を規定して施工を複数層繰り返した結果、仕上がり密度のばらつきを把握するとともに、要求性能を満足する施工が可能であることを確認できた。このことより、浅地中ピット処分施設における低透水層の施工においても工法規定方式の施工管理の適用が可能であることを確認できた。

4章では、施工段階のデータ（乾燥密度・含水比・混合率等）を用いて迅速に透水係数を評価するための代替指標についてまとめた。本研究では、中深度処分の材料については、既往研究の結果が適用できることを確認している。

一方、浅地中ピット処分の材料については、混合土中の通水経路を考慮し、間隙比が透水性に影響すると関わりと考えられたので、間隙比にかかる特性値を代替指標として選定した。間隙中を満たす水の存在形態について、自由に移動できる状態の自由水、モンモリロナイトの結晶層間に取り込まれた状態の層間水、土粒子表面に吸着した状態の吸着水の三つの状態を考慮した。そして、層間水はモンモリロナイトの体積を増加させるものとして混合土中の全間隙より削除しモンモリロナイトの体積に加えた。さらに、吸着水は通水に関わらない間隙として、混合土中の全間隙より削除した。このように通水に関わる間隙と吸水膨潤後のモンモリロナイトの体積比を「吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} 」として定義した。

吸水後の有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数の関係を整理した結果、有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} と透水係数との間の相関性は、有効飽和度 S_r' ごとに整理できることがわかった。有効飽和度 S_r' とは、モンモリロナイトの吸水膨潤と土粒子表面への水の吸着による影響を考慮した間隙と自由水の体積比と定義した。

有効飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' と透水係数との間の相関性は良好で、決定係数 R^2 は、 $R^2=0.8676$ と高い相関性を示した。さらに、有効飽和度 S_r' で整理することにより、有効粘土間隙比、有効モンモリロナイト間隙比等も透水係数の代替指標となりうることを示した。本研究ではこの結果より、有効飽和度 S_r' で正規化した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat}' を代替指標として提案した。ただし、有効飽和度 S_r' で正規化

した有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} は、層間水の量に上限値が存在する Ca 型ベントナイトに限り有効な整理方法であることに注意を要する。

有効ベントナイト密度、有効モンモリロナイト密度等の密度をベースにした諸特性は有効飽和度 S_r で整理する方法との相性は悪く、透水係数との相関性が有効飽和度 S_r ごとに分別される結果となった。

最後に、現場での施工データや工場出荷時のミルシートのデータより、有効モンモリロナイト間隙比 e_{msat} や有効飽和度 S_r を算出する手順をまとめ、施工時の品質確認に代替指標を活用する方法を提案した。

5章では、施工後土構造物の透水性の評価するための解析手法として、施工後のデータと第4章で示した代替指標との相関性より透水係数を求め、この透水係数の三次元空間への配置を数値解析により作成し構造物全体をモデル化すること、透水係数を配置した三次元モデル空間を用いて三次元飽和定常浸透流解析を実施し、マクロ透水係数（構造物全体を均一な透水係数を持つ要素と見立てた場合の等価な透水係数）により透水性を評価するという方法について説明した。また、粒子追跡法を浸透流解析後の計算結果に適用することにより、ベントナイト混合土で構築した土構造物を水が横断し、地下水が処分施設に到達するまでの時間を計算できるようにした。

本研究で採用したクリギングにより、測定データが存在しない空間にも特性値を配置したモデル空間を構築することができた。このモデル空間は単なる線形補間ではなく、距離が近ければそれだけ測定点における特性値の影響が出やすくなる相関長という範囲を適用したものである。このことより、単にランダムに特性値を配置した三次元空間分布モデルよりも実際の現場に近い三次元空間分布モデルを作成することが可能となった。このクリギングの技術を用いて作成した三次元空間モデルを用いて三次元飽和定常浸透流解析および粒子追跡法による到達時間の計算を実施した。三次元飽和定常浸透流解析によりモデル空間の横断面を通過する流量を算出し、この流量を断面積で除した値をマクロ透水係数として施工後の土構造物の透水性を評価する性能値として定義した。粒子追跡法による到達時間の計算結果のうち、特に最短の到達時間と管理型処分施設の管理期間の目安となる300年を比較し到達時間を観点として透水性能を評価した。マクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の結果は、2章で示した施工方法により施行をした結果、すなわち本研究で採取した施工後のベントナイト混合率・含水比・乾燥密度の平均値・ばらつきの程度であれば、構造物全体としての透水性能は要求性能を満足するものであると評価できた。

本研究で示した数値解析によるマクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の評価手法を用いて、透水係数のばらつきの許容限界について評価を行った。その結果、施工時の管理目標値として、要求性能を満たす目標の値（本研究では透水係数： $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ ）よりも 0.70σ 程度（ σ は標準偏差）程度大きい値を平均値とすればよいことが分かった。これは、標準偏差 σ が小さければ施工時の管理目標値を小さくしても、マクロ透水係数や粒子追跡法による到達時間で評価した場合、構造物全体としての透水性能を満足できることを意味す

るものである。一般的に適用できる知見として、対数透水係数の平均値と目標値の距離を標準偏差に対する倍数 $n \times \sigma$ として管理することで、施工時の管理目標としての分布幅の設定が可能となるといえる。また、対数透水係数の平均値が当初計画よりも小さい場合でも、対数透水係数の平均値と目標値の距離 $n \times \sigma$ を確認することで、要求性能を満足しているかの確認ができる。さらに、施工に起因するばらつきが対数透水係数の標準偏差 σ として表現できる場合、対数透水係数の目標値に対数透水係数の平均値と目標値の距離 $n \times \sigma$ を加えた対数透水係数の平均値を施工目標値として設定することが可能となる。

次に、本研究で示した数値解析によるマクロ透水係数および粒子追跡法による到達時間の評価手法に対する施工時の測定頻度の影響について、測定点の間隔を広く取った場合の数値計算上の実験を通じて評価した。その結果、本解析手法および入力データセットの範囲であれば、測定頻度を小さくしても、すなわち測定間隔を広く取っても ($1\text{m}^2/\text{点} \Rightarrow 10\text{m}^2/\text{点}$) 有意な影響は認められないことが分かった。

さらに、含水比および混合率のばらつきの影響を評価することにより、材料製造時のベントナイト混合土の含水比・混合率のばらつきの許容限界を確認した。その結果、含水比は・混合率ともに設定値 $\pm 3.0\%$ 以内 (本研究の場合、含水比: $19.0 \pm 3.0\%$, 混合率: $30.0 \pm 3.0\%$) であれば、施工後の構造物全体での透水性能への影響は少ないことがわかった。この結果より、材料の練り混ぜ製造時の管理目標として設定値 $\pm 3.0\%$ 以内という値が採択できると考えられる。

6章では、現場での乾燥密度の測定は非破壊で測定スピードも高い、3D スキャナによる方法を主に、この測定法と解析手法との組み合わせによるものを提案した。この際、見かけの層厚変化と密度変化率との間の相関式 (回帰直線) を作成する際の、コアカッター法の測定点数 (データの母数) が与える回帰直線の式の推定精度 (回帰直線の式から得られた乾燥密度のばらつきの程度) への影響を評価した。次にコアカッター法の測定点数の影響を受けた回帰直線より算出した乾燥密度を用いた場合の、解析に入力する透水係数のばらつき、解析後のマクロ透水係数等への影響を評価した。その結果、マクロ透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ (対数で-10.00) を上回るような解析結果が生じないことを条件として考慮すると、回帰直線推定時のデータ数は最低 50 点以上が必要であることがわかった。

最後に、この評価結果を受け、3D スキャナによる方法を主体とした現場での乾燥密度等の測定方法、および測定データを用いて実施する施工後土構造物の透水性評価解析を活用した現場での品質管理方法の提案を行った。これは、本施工に移る前に試験盛土時点でデータベースを構築し、50 点以上のコアカッター法による現場密度試験と、3D スキャナによる測量を行い 3D スキャナによる方法に用いる回帰直線を作成するとともに、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを算定しておくというものである。この試験盛土のデータベースを用いることによって本施工時の累計の施工層数が少ない段階でも施工後の低透水層の透水性能を地球統計学的手法による解析によって評価できる。施工段階が進み施工層数が多くなるにつれて現場の施工データが拡充されるのでこのデータベースを適

宜更新し、3D スキャナによる方法に用いる回帰直線や、地球統計学的手法の入力パラメータであるシルやレンジを更新し解析の精度を向上させていくものとする。乾燥密度以外に必要なモンモリロナイト含有率、土粒子密度の測定や透水試験は現場ではない場所での測定を行う必要があるので、現場での施工段階とは異なる計画段階で室内試験の一環として取得することとした。

このような品質管理にかかる施工の各段階で実施項目を併記しながら施工の流れがわかるようなフロー図を作成することができた。本研究により、施工に起因するばらつきを考慮した、施工目標値の設定の考え方や、施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめることができた。

本研究により、施工に起因するばらつきを考慮した、施工目標値の設定の考え方や、施工段階での品質管理における測定頻度の設定の仕方についての考え方をまとめることができた。また、低レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアのうち、低透水性を求められるベントナイト系材料の構築には、施工段階における現場密度試験の測定頻度も含め、工法規定方式での施工管理でも十分に対応できることを示すことができた。

謝辞

本論文は、著者が 2008 年から放射性廃棄物の低透水性材料の締固め施工に携わるようになってから実施してきた施工試験やそこで開発した技術を体系的にまとめたものである。今では当たり前のように施工しているベントナイト系材料の締固めも、当初においては要求される性能を確保できるのかを実証することが主目的であった。しかし、多くの先達の方々により技術開発によりベントナイト系材料の締固めも放射性廃棄物分野で求められる高密度・均一に施工が可能となるに至った。弊社技術者たちの記録や施工ノウハウを引き継ぐことの幸運な機会に恵まれたことや、ご指導いただいた先輩たち、関係各位のご協力・ご助力あつてのことである。

また、この機にご指導いただいた先生方は勿論のこと、様々な形でご助力を賜った方々のご芳名を記載させて頂き、この場を借りて深く感謝の言葉を捧げたい。

早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 小峯秀雄教授には、本研究に関連する「地下空洞型処分施設性能確認試験」のプロジェクトにまずは委員として低透水性・膨潤性材料という観点でのベントナイトの特有な性質についてご教授いただいた。また、現場の施工時に測定できる物性値から透水係数を推定する代替指標の考え方について懇切丁寧にご指導いただき、本論文で示すような形にまとめることができた。そして、この 13 年の間で何度も拙い論文草稿・原稿のために多くの貴重な時間を割いて頂き、不慣れな論文の執筆方法も含めて御助言を賜った。ここに衷心より深く感謝申し上げます。

早稲田大学創造理工学部社会環境工学科 秋山充良教授、赤木寛一教授には、ご多忙の中、副査をお引き受け頂き、細部にわたるご指導とともに賜った数々のご助言により、本論文を各段に充実させることができた。ここに深く感謝申し上げます。

原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)の寺田賢二氏との出会いが無ければ本論文を作成に至らなかったものと心得ている。著者が原環センターに出向中に受けたご指導はその後の人生においても何よりも代えがたい貴重なものであった。特に論文の作成や「地下空洞型処分施設性能確認試験」プロジェクトの 8 か年とりまとめ作成においては寺田氏のご指導あつてこそ結実したものであるといえる。ここに深く感謝を申し上げます。

日本原燃 工藤淳氏、ならびに東電設計 矢込吉則氏の両氏には、浅地中ピット処分の施工試験関連プロジェクトでご指導いただいた。工藤氏には透水係数の代替指標設定の重要性や同プロジェクトの重要性、矢込氏には品質管理手法の重要性や品質のばらつきの影響評価の重要性についてご指導いただいた。品質管理と性能のばらつきの問題提起が無ければ本論文の後半の評価方法のアイデアには到達できなかったと考える。ここに深く感謝申し上げます。

ジェイアール東海コンサルタンツ(元 千葉工業大学 教授)鈴木誠先生には、地球統計学的手法に関してご指導いただいた。R や PYTHON などを使ったプログラムの使い方をはじめ、理論や評価方法に至るまで懇切丁寧にご指導いただいた。鈴木誠先生のご指導が無ければ本論文もまとめることができなかったと考える。ここに深く感謝申し上げます。

今井久氏、山下亮氏、上田祥央氏には地球統計学的手法を適用するにあたり、具体的なプログラムの使い方を教えていただくとともに、数値解析の一部を担当していただいた。両氏のご助力が無ければ本論文は完成に至らなかった。ここに深く感謝申し上げます。

中越章雄氏、荻原績氏には施工試験時の現場管理において具体的かつ実践的な指導をいただいた。施工試験時においても実際の埋設処分事業を想起した問題提起やその解決策に至るまでご助言をいただき、無事、無事故・無災害で施工試験を完了できたとともに、目標とする品質を確保することができた。ここに深く感謝申し上げます。

千々松正和氏には著者が原子力部に配属された 2008 年からの 13 年間もの間、ベントナイト系材料の室内試験・施工試験に従事させていただき、また、時に厳しく時に暖かく、日頃の業務を通してのご指導により、当該分野における深い知識と技術を習得することができた。この知識と技術がベースとなって本論文がこのような形でまとめることができたのは、紛れもない事実である。ここに深く感謝申し上げます。

最後に、悩める時、苦しむ時に優しく、時として厳しく、温かく見守り、いつも寄り添い元気と勇気を与え続け支えてくれた家族に心から深く感謝の意を記したい。誠にありがとうございました。

2022 年 1 月

山田 淳夫

研究業績書

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	
○論文	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦: 放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる側部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集C (地圏工学) 72(2), 2016.6, pp.164-178.
○論文	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 藤原斉郁, 矢田勤, 秋山吉弘, 小峯秀雄, 飯塚敦: 放射性廃棄物の地下空洞型処分施設に用いる底部低透水層の転圧工法による施工品質の評価, 土木学会論文集C (地圏工学) 71(3), 2015.7, pp.147-162.
2. 講演	
○講演	<u>山田淳夫</u> , 伊藤歩夢, 千々松正和, 太田征志, 矢込吉則, 伊藤喜広: 実施工に向けた難透水性覆土および下部覆土の小型機械による施工試験結果, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会講演概要集 CS12-21, 2020.9
○講演	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 小栗光, 伊藤歩夢: 礫混じりベントナイト混合土を対象とした施工後の乾燥密度測定に関する研究, 第55回地盤工学研究発表会要旨集 23-7-4-04, 2020.7
○講演	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 小栗光, 塚尾伸, 工藤淳, 伊藤裕紀, 伊藤喜広: 実施工に向けた覆土の施工試験結果, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集 VII-142, 2019.9
○講演	<u>Atsuo Yamada</u> , Masakazu Chijimatsu, and Hideo Komine: Method for Measuring Dry Density of Compacted Bentonite Mixture Soil Using 3D Laser Scanner data, WM2019 Conference proceedings 19119, 2019.3
○講演	<u>山田淳夫</u> , 小栗光, 千々松正和, 塚尾伸, 工藤淳, 矢込吉則: 連続式ミキサーで製造した砂・ベントナイト混合土の施工試験結果 (その2 中型および小型振動ローラーによる締固め施工), 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集 CS7-037, 2018.8, pp.73~74.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 田嶋宏之, 千々松正和, 荻原績: 放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト混合土の施工技術および3Dレーザー測量による品質管理技術の開発, 土木学会土木建設技術発表会2017概要集, 2017.11, pp.24~29.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 永井裕之, 千々松正和, 浪岡翔吾, 工藤淳, 増田良一, 矢込吉則: 難透水性覆土の施工後品質測定における簡易手法による乾燥密度測定と補正に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-057, 2017.9, pp.113~114.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 永井裕之, 壺阪知広, 菊池喜昭, 龍岡文夫: ベントナイト混合土を用いた難透水性覆土の施工後の品質確認方法の検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.53-56.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 永井裕之: 混練時間と加水方法の違いによるベントナイト混合土の透水性への影響, 第51回地盤工学研究発表会要旨集 1099, 2016.9, pp.2197-2198.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 永井裕之, 千々松正和, 石濱裕幸, 田嶋宏之, 荻原績: 低レベル放射性廃棄物処分施設における難透水性覆土の施工の高度化の検討, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集 CS13-018, 2016.9, pp.35~36.
○講演	<u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘, 千々松正和, 永井裕之: 低レベル放射性廃棄物処分における埋戻し材に関する材料特性評価試験について (その3), 第50回地盤工学研究発表会要旨集 1182, 2015.9, pp.2363-2364.

研究業績書

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○講演	山田淳夫, 秋山吉弘, 永井裕之, 千々松正和: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工時の品質管理手法に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集 CS12-011, 2015.9, pp.21~22.
○講演	ATSUO YAMADA, YOSHIHIRO AKIYAMA, MASAKI NAKAJIMA, TSUTOMU YADA, MASAKAZU CHIJIMATSU, TAKAHIRO NAKAJIMA: Studies of construction methods for Bentonite engineered barrier systems for Sub-surface disposal: vibratory compaction, Geological Society London Special Publications 400(1), 2014.9, pp.135-pp.144.
○講演	山田淳夫, 秋山吉弘, 永井裕之, 千々松正和, 安田恵太: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工確認試験(その2)ー施工後の品質の確認ー, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集 CS9-025, 2014.9, pp.49~50.
○講演	山田淳夫, 秋山吉弘, 石橋勝彦: 地下空洞型処分施設における側部緩衝材を対象とした初期性能確認試験, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集 CS11-023, 2013.9, pp.45~46.
○講演	山田淳夫, 秋山吉弘, 河原忠弘, 千々松正和: 低レベル放射性廃棄物処分における上部埋戻し材に関する材料特性評価試験について, 第48回地盤工学研究発表会要旨集 1090, 2013.7, pp.2179-2180.
○講演	山田淳夫, 千々松正和, 中越章雄, 中島貴弘, 秋山吉弘: 締固め工法により施工された側部緩衝材の初期性能確認ー地下空洞型処分施設性能確認試験によるー, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集 CS3-002, 2011.9, pp.3~4.
3. その他	
(講演)	山田淳夫, 伊藤歩夢, 川久保政洋: 模擬坑道を対象とした地層処分場の埋め戻し材の転圧施工試験, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会講演概要集 CS12-39, 2021.9
(講演)	山田淳夫, 小栗光, 伊藤歩夢: 礫混じりベントナイト混合土への非破壊検査法の適用性に関する研究, 第56回地盤工学研究発表会要旨集 13-6-4-06, 2021.7
(講演)	塚尾伸, 工藤淳, 伊藤裕紀, 千々松正和, 山田淳夫, 小栗光, 伊藤喜広: 実施工に向けた覆土の施工方法検討, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会講演概要集 VII-141, 2019.9.
(講演)	山田淳夫, 千々松正和, 小栗光: Na型ベントナイト混合土を対象とした施工後品質の測定方法に関する研究, 第54回地盤工学研究発表会要旨集 1047, 2019.7, pp.2093~2094.
(講演)	小栗光, 山田淳夫, 千々松正和, 塚尾伸, 工藤淳, 矢込吉則: 難透水性覆土材の環境条件による品質変動確認試験, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集 CS7-038, 2018.8, pp.75~76.
(講演)	山田淳夫, 千々松正和, 小栗光: 礫混じりの混合土を対象とした施工後乾燥密度測定方法の検討, 第53回地盤工学研究発表会要旨集 0405, 2018.7, pp.809-810.
(講演)	千々松正和, 山田淳夫, 永井裕之, 田嶋宏之, 石濱裕幸, 荻原績: 浅地中処分施設における難透水性覆土の施工技術の高度化に関する検討, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-065, 2017.9, pp.129~130.

研究業績書

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(講演)	小栗光, 永井裕之, <u>山田淳夫</u> , 千々松正和, 成島誠一, 新井靖典: 放射性廃棄物処分場における施工管理方法 (その1. 非破壊密度測定による管理), 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-052, 2017.9, pp.103~104.
(講演)	田嶋宏之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 荻原績: 放射性廃棄物処分場における施工管理方法 (その2. 3Dレーザー測量による高さ管理), 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集 VII-053, 2017.9, pp.105~106.
(講演)	永井裕之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 三反畑勇, 壺阪知広: 難透水性覆土の品質確認へのRI計器,SDGの適用性検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.57-60.
(講演)	千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 永井裕之: 低透水性材料の透水試験方法に関する検討, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12, pp.23-28.
(講演)	石濱裕幸, 田嶋宏之, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> , 秋山吉弘: 地下空洞型処分施設における上部埋戻し材の施工確認試験 (その1) —施工性の確認—, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集 CS9-024, 2014.9, pp.47~48.
(講演)	秋山吉弘, 中島昌樹, <u>山田淳夫</u> , 矢田勤, 千々松正和, 中島貴弘: 狭隘部におけるベントナイト締固めによる側部緩衝材 (低透水層) の施工性確認—平成23年度地下空洞型処分施設性能確証試験による—, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集 CS13-015, 2012.9, pp.29~30.
(講演)	中島貴弘, <u>山田淳夫</u> , 木村誠, 千々松正和: ベントナイト混合土の品質管理方法 (混合率) に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集 CS13-010, 2012.9, pp.19~20.
(講演)	中島貴弘, 秋山吉弘, 中島昌樹, 矢田勤, 千々松正和, <u>山田淳夫</u> : 放射性廃棄物処分における狭隘部ベントナイト緩衝材の小型振動ローラによる施工結果評価について—平成23年度地下空洞型処分施設性能確証試験による—, 第47回地盤工学研究発表会要旨集 962, 2012.7, pp.1915-1916.