

不飽和浸透特性モデルにおける間隙径分布  
推定方法の改良とその改良効果の評価

(Improvement of pore size distribution estimation  
method in unsaturated seepage property model and  
evaluation of its improvement effect)

2024年3月

中島 亮輔



# **Improvement of pore size distribution estimation method in unsaturated seepage property model and evaluation of its improvement effect**

**March 2024**

**Ryosuke NAKAJIMA**

## **Summary of Doctoral Dissertation**

This thesis deals with a research on improving estimation accuracy and practical application of a mathematical model for unsaturated seepage properties with probability statistics.

The soil-water characteristic curve (SWCC) and unsaturated hydraulic conductivity are essential parameters for controlling the seepage behavior of pore water in unsaturated soil. Various models have been proposed to estimate SWCCs and unsaturated hydraulic conductivity because water retention and unsaturated hydraulic conductivity tests are complicated and time-consuming. Many studies have proposed functional equation models to represent the unsaturated seepage behaviors (e.g., van Genuchten model and Mualem model). These models determine the parameters in the functional equation by curve fitting the results of the laboratory test. Therefore, in the absence of laboratory test results, it is difficult to determine the parameters of the functional equation. This study focuses on the mathematical model of unsaturated seepage behaviors using the statistical and probabilistic methods. The hydraulic properties of unsaturated soils are calculated using the pore size distribution, which is estimated from the grain size distribution and void ratio. In this paper, calculation methods of pore size distribution, (PSD) were studied to improve the estimation accuracy of water retention and permeability with the model. In addition, a determination method of model parameters for each soil type based on basic physical properties is proposed in order to increase the utility of the model.

Chapter 1, the background, and the objective of this study was clarified.

Chapter 2 provides an overview of mathematical model and the process of calculating the SWCC and unsaturated hydraulic conductivity.

In the Chapter 3 described a method for deriving the PSD focusing on the pore structure of the soil. The PSD contributing to suction and the parallel shift index, ( $I_{pt}$ ) proposed in a previous study, which were obtained from the results of a soil-water retention test, were reviewed, and a derivation formula was proposed to calculate the parallel shift index from the grain size characteristic values (fine fraction content, ( $F_c$ ) and uniformity coefficient, ( $U_c$ )). In addition, we proposed the contribution ratio, which is the ratio of pore water contributing to suction to each suction and discussed the relationship between the contribution ratio and the fine particle content in each suction. As a result, the following findings were obtained.

- 3-1) The results of water retention tests on 24 samples of volcanic sandy soils showed that soils with higher  $F_c$  and  $U_c$  tended to have larger  $I_{pt}$ . This suggests that the more fine

particles a soil has, the more pore water contributes to suction. The equations derived by linear regression are proposed based on the relationship between the two.

- 3-2) The contribution ratio of porewater to each suction was proposed and its relationship to the  $F_c$  was examined. The results showed that porewater contributes more to suction in low suction areas (high saturation areas), and that the higher the  $F_c$  of the soil, the larger the contribution rate in each suction area. The relationships were also found to be strongly correlated.

In Chapter 4, the model parameter required to derive PSD characteristic length,  $D_{cha}$  was focused on, and an equation to calculate  $D_{cha}$  from grain size distribution was proposed. The validity of the equation was examined using 42 samples of volcanic sandy soils and sandy soils. In addition, focusing on the minimum grain size  $D_\alpha$  when calculating  $D_{cha}$  from the grain size distribution, methods for estimating  $D_{cha}$  and  $D_\alpha$  from the grain size characteristic values were examined. The results obtained in this chapter are shown below.

- 4-1) The proposed  $D_{cha}$  equation overestimates the effect of the number of fine grains, resulting in a smaller calculated  $D_{cha}$  size and underestimation of the PSD. Therefore, the SWCC is overestimated.
- 4-2) A method was proposed to estimate the optimal  $D_{cha}$  by restricting the minimum grain size  $D_\alpha$  in the equation. The correlation between grain size characteristic values ( $F_c$  and  $U_c$ ), minimum grain size ( $D_\alpha$ ), and  $D_{cha}$  was investigated. It was observed that the relationship typically falls within the range of  $10^{-4} < D_\alpha$  (mm)  $< 10^{-3}$ , particularly for soils exhibiting  $F_c$  greater than 10% and  $U_c$  ranging from 25 to 100.
- 4-3) SWCCs were derived by employing  $D_{cha}$  with  $D_\alpha$  values of  $10^{-3}$  and  $10^{-4}$  mm for soils exhibiting  $F_c$  greater than 10% and  $U_c$  ranging from 25 to 100, respectively, were compared with the test results. SWCCs obtained from  $D_{cha}$  with  $D_\alpha = 10^{-4}$  mm were close to the experimental values, and the accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately  $W_v \pm 0.1$ . When  $D_\alpha$  is set to the geometric mean the accuracy is found to be  $W_v \pm 0.05$ .

In Chapter 5, soil water retention tests using continuous pressure plate methods were conducted on soils with several different grain sizes to evaluate the methods for PSDs proposed in Chapter 3 and 4. In addition, some modifications were made to the test apparatus to improve the measurement accuracy and shorten the test time, and the effects of these modifications are also described. The findings of this chapter are summarized as follows.

- 5-1) To improve the measurement accuracy and shorten the test time, it is effective to measure the pore water pressure at the center of the specimen and to improve the

drainage at the bottom of the specimen.

- 5-2) Soil-water retention tests were conducted on volcanic sandy soils of different grain sizes, and the results showed that the higher the  $F_c$ , the higher the soil water retention.

In Chapter 6, using the test results obtained in Chapter 5, the equation for calculating the  $I_{pt}$  from grain size characteristic values ( $F_c$  and  $U_c$ ) proposed in Chapter 3 and the method for determining  $D_{cha}$  using  $D_\alpha$  (mm) proposed in Chapter 4 were evaluated. The scope of application of both proposed methods were discussed, and the estimation accuracy of both proposed methods were clarified. The findings of this chapter are summarized as follows.

- 6-1) The evaluation of the equation for calculating the  $I_{pt}$  from grain size characteristic values ( $F_c$  and  $U_c$ ) proposed in Chapter 3 revealed that for samples with  $F_c = 16\%$ , and  $20\%$ , the calculated results were closed to the tests results. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately  $W_v \pm 0.05$ .
- 6-2) For the samples with  $F_c = 30\%$ , and  $40\%$ , the tests and calculated results differed. This difference can be attributed to the lack of data for this range of soils and to the clumping of the samples. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately  $W_v \pm 0.1$ .
- 6-3) The method for determining  $D_{cha}$  using  $D_\alpha$  (mm) proposed in Chapter 4 was evaluated. For soils exhibiting  $F_c$  greater than  $10\%$  and  $U_c$  ranging from 25 to 100, the test results fell within the calculated range of  $D_\alpha = 10^{-4}$  mm and  $10^{-3}$  mm. The geometric mean of  $D_\alpha$  can be used to determine  $D_{cha}$  to estimate the close SWCCs to the test results. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately  $W_v \pm 0.05$ .

In Chapter 7, the findings of this study were concluded, and prospects of the research were summarized.



# 目次

目次.....	7
第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景と目的.....	1
1.2 不飽和浸透特性モデルに関する既往の研究.....	2
1.3 博士論文の構成.....	5
参考文献.....	6
第2章 間隙モデルの概要.....	8
2.1 本章の目的.....	8
2.2 間隙モデルの概要.....	8
2.2.1 間隙モデル.....	8
2.2.2 間隙モデルへの確率論の援用.....	9
2.2.3 間隙比の算定.....	11
2.2.4 サクシヨンの算定.....	12
2.2.5 体積含水率の算定.....	13
2.2.6 不飽和透水係数の算定.....	14
2.3 間隙モデルの計算過程.....	16
参考文献.....	18
第3章 土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出に関する検討 (Case1) .....	19
3.1 本章の概要.....	19
3.2 Sako and Kitamura (2006)による平行移動指数の提案.....	19
3.2.1 間隙モデルによる計算結果と保水性試験結果の比較.....	19
3.2.2 水分特性曲線のフィッティング方法と平行移動指数の提案.....	22
3.3 平行移動指数と粒度特性値との関係.....	25
3.3.1 本検討で用いる試料と保水性試験.....	25
3.3.2 粒度特性値と平行移動指数との関係.....	28
3.4 平行移動指数と粒度特性値との関係式を用いた保水性推定精度に関する検討....	31
3.5 寄与率の提案.....	32
3.5.1 寄与率の提案.....	32
3.5.2 寄与率の特徴についての検討.....	34
3.6 本章のまとめ.....	38
参考文献.....	39
第4章 素体積高さ $D_{cha}$ に着目した間隙径分布の導出に関する検討 (Case2) .....	40
4.1 本章の概要.....	40
4.2 素体積高さ $D_{cha}$ に関する式の提案.....	40

4.3	Kitamura and Sako (2020)による式の改良.....	45
4.4	最適な最小粒径 $D_{\alpha}$ に関する検討.....	47
4.5	$D_{cha}$ , $D_{\alpha}$ と粒度特性値との関係.....	49
4.6	最小粒径 $D_{\alpha}$ を用いた $D_{cha}$ の推定および水分特性曲線の推定精度.....	52
4.7	本章のまとめ.....	54
	参考文献.....	55
第5章	提案手法の妥当性の検討のための保水性試験.....	56
5.1	本章の概要.....	56
5.2	連続加圧型加圧板法の概要.....	56
5.3	測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良.....	57
5.3.1	間隙水圧測定部の改良.....	57
5.3.2	間隙水圧の測定位置に関する装置改良効果の検討.....	59
5.3.3	排水部の装置改良.....	63
5.3.4	排水部の改良効果の検討.....	65
5.4	試験装置の安定性向上を目的とした試験装置の改良.....	68
5.4.1	吸排水測定機構の改良.....	68
5.4.2	吸排水の測定機構の違いに伴う試験結果の比較.....	70
5.5	粒度を調整した試料の保水性試験.....	71
5.5.1	試料の調整方法.....	71
5.5.2	粒度を調整した保水性試験.....	73
5.6	本章のまとめ.....	74
	参考文献.....	75
第6章	提案手法の評価.....	76
6.1	本章の概要.....	76
6.2	Case1 (第3章) の提案手法の評価.....	76
6.2.1	粒度特性値と平行移動指数の導出式の評価.....	76
6.2.2	保水性推定精度の評価.....	79
6.3	Case2 (4章) の提案手法の評価.....	79
6.3.1	最適な $D_{cha}$ を決定する手法の評価.....	79
6.3.2	保水性推定精度に関する評価.....	82
6.4	本章のまとめ.....	83
	参考文献.....	85
第7章	結論.....	86
7.1	本論文のまとめ.....	86
7.2	今後の展望.....	88
	謝辞.....	90



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

近年地球温暖化等の気候変動により、異常気象が激甚化・頻発化しており、将来的にも増加する可能性が指摘されている。日本各地においても、梅雨時期や台風襲来期に局所的大雨が発生し、土砂災害やがけ崩れといった斜面災害や河川堤防の決壊や盛土の崩壊が発生している。国土交通省の令和4年度の土砂災害の報告書<sup>1)</sup>によると、令和4年に発生した土砂災害発生件数は795件となり前年に比べて減少しているが、42道府県で発生しており、土砂災害による被害は広範囲に及んでいる。過去10年間の土砂災害発生件数の平均と比較すると、平成15年から平成24年の10年間では平均1180件/年に対し、平成25年から令和4年の10年間では平均1446件/年発生しており、この10年間で1.2倍増加しており今後も増加の傾向が続く可能性を示唆している。

このような、豪雨時の土砂災害および、河川堤防の決壊、盛土の崩壊等から人々の命を守るためには、降雨時の斜面の浸透挙動を適切に把握する必要がある。例えば、斜面崩壊の予測やメカニズムの解明に関する研究では、浸透-応力解析連成解析が用いられている。河川堤防や土構造に対しては設計時や補修時に行われる安全性評価が重要となる。河川堤防の設計においては飽和-不飽和浸透流解析と極限平衡法（修正フェレニウス法）、浸透に対する安全性照査<sup>2)</sup>が実施される。また、鹿児島県では、築堤年代が古い河川堤防の補修を行う際に浸透流解析と安定解析を実施して、危険箇所を抽出することで、危険箇所を優先的に補修することが実施されており<sup>3)</sup>、新規の河川堤防の設計のみならず、維持管理においても活用されている解析手法である。このような浸透流解析や斜面安定解析の精度向上を図るためには、解析に用いる土質定数や土質の特性値の適切な設定が重要であると考えられる。そこで本研究では、飽和-不飽和浸透流解析に用いられる不飽和浸透特性（水分特性曲線・不飽和透水係数）に着目する。不飽和浸透特性は、飽和-不飽和浸透流解析のリチャーズ式を解くために用いられる土の特性値である。水分特性曲線は土の保水性を表す特性値で、体積含水率または飽和度と土中のサクシヨンの関係であり、不飽和透水係数は体積含水率または飽和度と透水係数（比透水係数）の関係である。しかし、水分特性曲線を求めるための保水性試験や、不飽和透水試験は複雑かつ時間を要することから、河川堤防の安全性照査<sup>2)</sup>においては、実務的な割り切りのもと、簡易的に分類された礫質・砂質土、砂質土、粘性土の不飽和浸透特性の代表値が使用されている。その他の実務や研究においても、その試験の複雑さから、室内試験を実施して解析に反映させることが少ないことが現状である。また、シラスのような特殊土を築堤材料とする河川堤防や斜面に対する浸透流解析や安定解析を行う際には、どの代表値を用いるか判断するためには技術や経験を要する。

そこで本研究では、土構造物の設計時の基礎調査や地盤災害後の現地調査から得られる基礎的な土質の物性値から不飽和浸透特性を推定する数理モデル<sup>4)5)</sup>（以下、間隙モデル）の改良を行い、モデルの保水性推定精度を向上させることを目的としている。間隙モデルは土粒子の大きさに関して、確率のおよび力学的考察を入れることによって、不飽和土の保水・浸透特性を表す水分特性曲線および不飽和透水係数を推定する数理モデルである。粒径加積曲線と間隙比を基に間隙径分布を推定し、水分特性曲線および不飽和透水係数を導出する。本研究では、主に間隙径分布の導出に関するモデルのパラメータと、粒径加積曲線から得られる粒度特性値との関係を明らかにすることで、モデルの推定精度を向上させると

ともに予測性の高いモデルへ改良する。また、これまでにモデルの推定精度に対する検討が行われていないため、提案する間隙径分布の導出手法から得られた水分特性曲線の推定精度を明らかにする。本研究により浸透流解析を活用する実務や研究において、不飽和浸透特性の設定が容易になり実際の地盤の浸透特性を解析に反映させることが可能となる。

## 1.2 不飽和浸透特性モデルに関する既往の研究

一般的に不飽和浸透特性の室内試験は複雑かつ時間を要する。地盤工学会基準土の保水性試験方法<sup>6)</sup>によると、保水性試験では供試体の平衡状態を確認する必要があり、平衡状態となるまで1か月以上要する場合がある。保水性試験には試験方法や装置が様々あり、測定範囲に応じて試験方法や試験装置を選択する必要があるため、非常に複雑となっている。また、不飽和透水係数を得るための室内試験は確立されていない。そのため、不飽和浸透特性を求めるための室内試験は広く一般化されていない。また、適切なタイミングで試験結果を提供することができないため、土構造物の設計や安全性照査には割り切りのもと代表的な値を用いて計算が行われ、研究においても実際の地盤の浸透特性を反映させることが難しいことが現状である。

このような背景から、不飽和浸透特性をモデルで推定する研究が行われている。不飽和浸透特性を求めるためのモデルとしては、不飽和浸透特性を関数式で表すモデルと土の基礎的な物性値（粒度や間隙比）から不飽和浸透特性を推定するモデルが挙げられる。

初めに、不飽和浸透特性を関数で表すモデルについて述べる。表1.2.1に水分特性曲線を関数式で表すモデルを示す。水分特性曲線を関数式で表すモデルには、試験結果に対してカーブフィッティングを行うことで水分特性曲線を表現するモデルが挙げられる<sup>7-11)</sup>。これらのモデルは、不飽和透水係数を計算するためのモデル<sup>7,12)</sup>に対して、圧力水頭を挿入するために提案されたモデルであり、水分特性曲線の試験値を経験的な関数で表せる。これらの関数式モデルは、離散的な試験値を連続的に表現することが可能となるため、土中の浸透に関する数値解析を行う際に有用であり、特にvan Genuchtenモデルは解析ソフト等<sup>13)</sup>や河川堤防の構造検討の手引き<sup>2)</sup>にも掲載されているため、研究や実務の様々な場面において利用されている。このようなモデルは、離散的な試験値を関数式で表現することを目的としているため、モデル内のパラメータは水分特性曲線の形状を決定するものであり、一般的にパラメータに物理的な意味を持たない。関数内のパラメータの決定方法には、基礎的な土質の物性値からパラメータを決定する方法（pedotranfer function）<sup>14,15)</sup>、土中の水の浸透に関する計測や実験から浸透流解析用いて逆解析<sup>16)</sup>を行う方法、近年では機械学習を用いる方法<sup>17)</sup>が提案されているが、いずれの方法も保水性試験結果や浸透試験結果がない場合、土質ごとに関数式のパラメータを決定するためには技術が必要である。また基礎的な土質の物性値から関数式のモデルパラメータを決定する方法<sup>14)</sup>では、各土質のパラメータの代表値が提案されているが、それらの土質はUSDA（アメリカ農務省）に従って区分されており、日本の土質に対応しているかどうか明らかになっていない。

次に、土の基礎的な物性値（粒度や間隙比）から不飽和浸透特性を推定するモデルについて述べる。Fredlund<sup>18)</sup>は粒径加積曲線から水分特性曲線を推定する方法を以下の3種類に分類している。

- 方法1 様々な土の中のサクションに対する含水比の統計的な推定
- 方法2 水分特性曲線を表現する関数式のパラメータの推定
- 方法3 水分特性曲線の推定に粒径加積曲線を用いた物理経験的モデル

方法 1 には、組成（砂・シルト・粘土の含有率）や有機物の含有率、乾燥密度から水分特性曲線を推定する回帰式がある<sup>19)</sup>。この方法は、水分特性曲線の試験結果にスプライン法を用いて平滑化し、土の組成（砂・シルト・粘土の含有率）や有機物の含有率、乾燥密度などを説明変数、体積含水率を目的変数として重回帰分析を行うことで、水分特性曲線を推定する関数式を導出する。方法 2 には水分特性曲線の関数式のパラメータを粒径加積曲線に関するパラメータや土質の組成と関連付けることで推定する手法が挙げられる。例えば、Brooks and Corey モデルのパラメータを砂分、粘土間隙率から推定する回帰式<sup>20)</sup>が提案されている。方法 3 には、粒度分布や乾燥密度を用いた物理・経験的モデル<sup>21)</sup>が挙げられる。このようなモデルは、粒径と間隙径を関連付けることによって、水分特性曲線を推定する。また、土粒子を均一な球と仮定して、土粒子の周りに付着する水の体積と、ヤングラプラス式によりサクションを計算する物理的なモデル<sup>22-24)</sup>が提案されている。このように、方法 3 に含まれる物理的なモデルの多くは、土の基礎的な物性値から水分特性曲線が推定することを目的としているため、パラメータの決定が容易である。また、そのモデルの多くが水分特性曲線を推定すると同時に、間隙構造を評価することができるため、モデルの高度化を進めることで複雑な不飽和土質力学を解明につながると考えられる。

本研究では、方法 3 に含まれる土の基礎的な物性値から不飽和浸透特性を推定する間隙モデル<sup>4,5)</sup>に着目している。間隙モデルは土粒子の大きさに関して、確率のおよび力学的考察を入れることによって、不飽和土の保水・浸透特性を表す水分特性曲線および不飽和透水係数を推定する数理モデルである。粒径加積曲線と間隙比を基に間隙径分布を推定し、水分特性曲線および不飽和透水係数を導出する。粒径加積曲線や間隙比は、比較的簡単な室内試験で得ることができる土の物性値であり、土構造物の設計や安全性照査を実施する時前の基礎調査で必ず実施される試験である。斜面災害等が発生した際に行われる現地調査においても、簡易的なサンプリング器具により試料を採取することで得られる物性値である。そのため、このような基礎的な土の物性値から、実際の地盤の不飽和浸透特性に近い値が得ることができれば、実務や研究における解析に実際の地盤の浸透特性を反映させることが容易となる。また、モデルの精度向上により本モデルを活用した斜面崩壊予知システム<sup>25)</sup>や斜面崩壊のメカニズムの解明につながると考えられる。

これまでに、モデルの推定精度を向上させるために、水分特性曲線のフィッティング方法や、モデルパラメータの平行移動指数  $I_{pt}$  が提案されてきた<sup>5)</sup>。平行移動指数は、粒径加積曲線と間隙比から算出される間隙径分布と水分特性曲線の試験値から逆算した間隙径分布（サクションに寄与する間隙径分布）から、算出されるパラメータである。サクションに寄与する間隙径分布を導出し、平行移動指数を提案することでモデルの推定精度が向上したが、それらを算出するためには、水分特性曲線の試験結果が必要となる。また、間隙径分布を導出するために必要なモデルの素体積高さ  $D_{cha}$  について、従来のモデルでは全ての土質に対して  $D_{10}$ （10%通過粒径）が用いられているが、土質に応じて決定することで水分特性曲線の推定精度が向上すると考えられる。

そこで本論文では、主にモデルの間隙径分布の導出方法に着目し、間隙径分布の導出方法を検討することで、モデルの保水性推定精度を向上させることを目的としている。初めに、平行移動指数を用いた間隙径分布の導出方法<sup>5)</sup>に対して再検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出する式を提案する。また、サクション寄与する間隙水の割合（寄与率）を保水性試験結果から求め、その特徴について議論する。さらに、間隙径分布の導出するために重要なモデルのパラメータの素体積高さ  $D_{cha}$  について、パラメータを土質ごとに決定することで間隙径分布を導出する方法を提案する。最後に、各提案手法の、適

用範囲や推定精度について検討を行い、保水性試験を実施することで評価を行う。

表 1.2.1 不飽和浸透特性を関数式で表現するモデル

モデル	式	フィッティング パラメータ
Burdine (1953)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{\left(1 + (\alpha\psi)^n\right)^{\left(1 - \frac{2}{n}\right)}} \right]$ <p><math>\psi</math>: サクシオンまたはポテンシャル, <math>\theta</math>: 体積含水率, <math>\theta_s</math>: 飽和時の体積含水率, <math>\alpha, n</math>: 水分特性曲線の形状に関するパラメータ.</p>	$\theta_s, \theta_r, \alpha, n$
Gardner (1956)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{\left(1 + \alpha\psi^n\right)} \right]$ <p><math>\psi</math>: サクシオンまたはポテンシャル, <math>\theta</math>: 体積含水率, <math>\theta_s</math>: 飽和時の体積含水率, <math>\alpha, n</math>: 水分特性曲線の形状に関するパラメータ.</p>	$\theta_s, \theta_r, \alpha, n$
Brooks and Corey (1964)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{\psi_e}{\psi} \right)^\lambda \quad \psi < \psi_e$ $\theta = \theta_s \quad \psi \geq \psi_e$ <p><math>\psi</math>: サクシオンまたはポテンシャル, <math>\psi_e</math>: 空気侵入値, <math>\lambda</math>: 水分特性曲線の形状に関するパラメータ, <math>\theta</math>: 体積含水率, <math>\theta_s</math>: 飽和時の体積含水率.</p>	$\theta_s, \theta_r, \psi_e, \lambda$
van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{\left(1 + (\alpha\psi)^n\right)^m} \right]$ <p><math>\psi</math>: サクシオンまたはポテンシャル, <math>\theta</math>: 体積含水率, <math>\theta_s</math>: 飽和時の体積含水率, <math>\alpha, n, m (= 1 - 1/n)</math>: 水分特性曲線の形状に関するパラメータ.</p>	$\theta_s, \theta_r, \alpha, n, m$
Fredlund and Xing (1994)	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\alpha}{\psi} \right)^n \right)^m} \right]$ <p><math>\psi</math>: サクシオンまたはポテンシャル, <math>\theta</math>: 体積含水率, <math>\theta_s</math>: 飽和時の体積含水率, <math>\alpha, n, m</math>: 水分特性曲線の形状に関するパラメータ, <math>e</math>: ネイピア数.</p>	$\theta_s, \theta_r, \alpha, n, m$

ただし  $\theta_r$  の物理的意味は厳密には定義されていない。

### 1.3 博士論文の構成

本論文は以下の章から構成される。

第1章では、本論文の研究背景や既往研究、研究目的を取り纏めるとともに、本論文の構成を示した。

第2章では、本論文で対象としている間隙モデルの概要と計算過程を示した。

第3章では、土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出方法について述べる。まず、Sako and Kitamuraが提案する保水性試験結果から算出される間隙径分布の逆算値と、その逆算値から得られるサクシオンに寄与する間隙径分布の導出方法について整理する。また、元の間隙径分布とサクシオンに寄与する間隙径分布から得られる平行移動指数と、粒度特性値との関係性について再検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出するための導出式を提案し、その精度について明らかにする。また、各サクシオンにおけるサクシオンに寄与する間隙水の割合を寄与率として提案し、各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について考察する。

第4章では、モデルの素体積高さ  $D_{cha}$  に着目した間隙径分布の導出方法について述べる。素体積高さ  $D_{cha}$  はその土を代表する粒径粒径（代表粒径、特徴粒径）と定義されており、間隙径分布の導出に関するパラメータである。従来の間隙モデルでは、 $D_{10}$ （10%通過粒径）が透水係数に影響を及ぼす粒径であることが知られていることから、 $D_{cha}=D_{10}$  と固定してきた。しかし、土質によって粒度加積曲線は異なるため、間隙径分布に関する代表粒径が土質ごとに存在すると考える。したがって、本章では前述したサクシオンに寄与する間隙径分布に関する代表粒径を土質ごとに決定することを目的とする。そこで、サクシオンに寄与する間隙径分布に関する素体積高さ  $D_{cha}$  を土質ごとに決定するための導出式を提案し、シラスを含む砂質土と砂質土の保水性試験結果から  $D_{cha}$  を算出した。 $D_{cha}$  と式中のパラメータと粒度特性値との関係について検討し、最終的に粒度特性値から  $D_{cha}$  を求めることにより、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出する方法を提案する。加えて、提案手法の適用範囲や保水性推定精度について議論する。

第5章では、第3章と第4章で提案した間隙径分布の導出手法の評価を行うために、連続加圧型加圧板法による保水性試験を実施した。東俣シラスの粒度を調整した試料に対して同条件で保水性試験を行うことで、粒度の異なる水分特性曲線を得た。加えて、連続加圧型加圧板法の測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良と、試験装置の安定性の向上を目的とした、吸排水の測定機構の改良を行ったため、その改良効果についても述べる。

第6章では、5章で得られた粒度の異なる保水性試験結果を用いて、3章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式と4章で提案した  $D_a$  (mm) を用いた  $D_{cha}$  の決定手法の評価を行う。また両者の提案手法の適用範囲について議論するとともに、両者の手法の推定精度について明らかにする。

第7章では、本論文の成果をまとめるとともに、今後の課題を示した。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：令和4年の土砂災害，2023。  
(<https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r4dosha/r4doshasaigai.pdf>) (2023.12 時点)
- 2) 財団法人国土技術センター：河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），pp.42-85, 2012.
- 3) 国立大学法人鹿児島大学：平成29年度シラス堤防の浸透および越水に対する安定性に関する検討，2018.
- 4) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, J. and Seyama, M: A numerical model for seepage through un-saturated soil, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 4, pp.261-265, 1998.
- 5) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 6) 地盤工学会編，地盤材料試験の方法と解説，第一回改訂版，二分冊の一，第3編7章土の保水性試験，pp.184-198, 2020.
- 7) Burdine, N. T.: Relative permeability calculations from pore size distribution data, *Journal of petroleum Technology*, 5, pp.71-78, 1953.
- 8) Gardner, W.: Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils, *Highway Research Board Special Report 40 international Symposium on Physico-Chemical Phenomenon in Soils*, Washington D.C., pp.78-87, 1956.
- 9) Brooks, R. and Corey, A.: Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Paper*, Vol.3, Colorado State University, Fort Collins, Co., 1964.
- 10) van Genuchten, M. Th.: A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.892-898, 1980.
- 11) Fredlund, D.G and Xing, A.: Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 521-532, 1994.
- 12) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12, pp.513-522, 1976.
- 13) Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th. and Sejna M.: The HYDRUS-D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 3.0. HYDRUS Software Series 1, Dep. of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA. 2005.
- 14) Carsel, R. F., and Parrish, R. S.: Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics, *Water Resour. Res.*, 24, pp.755-769, 1988.
- 15) Wösten, J. H. M., Finke, P. A., and Jansen, M. J. W.: Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics, *Geoderma*, 66, pp.227-237, 1995.
- 16) Eching, S. O., and Hopmans, J. W.: Optimization of hydraulic function from transient out flow and soil water pressure data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, pp.1167-1175, 1993.
- 17) Pachepsky, Y. A., Timlin, D. J., and Varallyay, G. Y.: Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, pp.727-733, 1996.
- 18) Fredlund, M. D., Wilson, G. W., and Fredlund, D. G.: Use of the grain-size distribution of estimation of the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.*, 39, pp.1103-1117, 2002.

- 19) Gupta, S. C., and Larson, W. E.: Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density, *Water Resour. Res.*, 15(6), pp1633-1635, 1976.
- 20) Rawls, W. J., and Brakensiek, D. L.: Prediction of soil water properties for hydrologic modeling, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers Watershed Management in the Eighties Symposium*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 293-299, 1985.
- 21) Arya L.M. and Paris J.F.: A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, pp.1023-1030, 1981.
- 22) 中尾隆志, 藤田睦博: 球形粒子モデルを用いた土壌内保水機構に関する微視的解釈, *水文・水資源学会誌*, Vol. 16, No.1, pp. 56-68, 2003.
- 23) 高橋伸英, 鶴川正剛, 新井親夫, 福長博, 山田興一: 粒度分布を用いた土壌の水分特性の推定, *化学工学論文集*, 第38巻, 第5号, pp.305-311, 2012.
- 24) Jaafar, R., and Likos, W. J.: Estimating water retention characteristics of sands from grain size distribution using idealized packing conditions, *Geotech. Test. J.*, 34, pp.489-502, 2011.
- 25) 北村良介, 酒匂一成, 加藤俊二, 水島俊基, 今西肇: 降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土質試験, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 2, No.3, pp.149-168, 2007.

## 第2章 間隙モデルの概要

### 2.1 本章の目的

間隙モデルは、土粒子の大きさに関して、確率のおよび力学的考察を入れることによって、不飽和土の保水・浸透特性を表す水分特性曲線および不飽和透水係数を推定する数値力学的モデルである。土の基礎的な物性値である粒径加積曲線や間隙比を基に間隙径分布を推定し、水分特性曲線や不飽和透水係数を計算する。また水分特性曲線や不飽和透水係数の試験結果が1点でもあれば、間隙径分布を逆算することができる。間隙モデルは Kitamura et al.<sup>1)</sup>によって提案されたモデルであり、Sako and Kitamura<sup>2)</sup>によってモデルが改良され、実験値にフィッティングする手法が提案されている。本章では Sako and Kitamura<sup>2)</sup>を基に間隙モデルの概要と計算過程を述べる。

### 2.2 間隙モデルの概要

#### 2.2.1 間隙モデル

間隙モデルは、土の状態を表現するために数学の一分野である確率論および確率論を基礎とする推測統計学を援用している。推測統計学とは、無作為抽出された部分集団（標本集団）の情報から抽出元である全集団（母集団）の特性を推定しようとするものである。図 2.2.1 を用いて基本粒状体および基本粒状体について説明する。

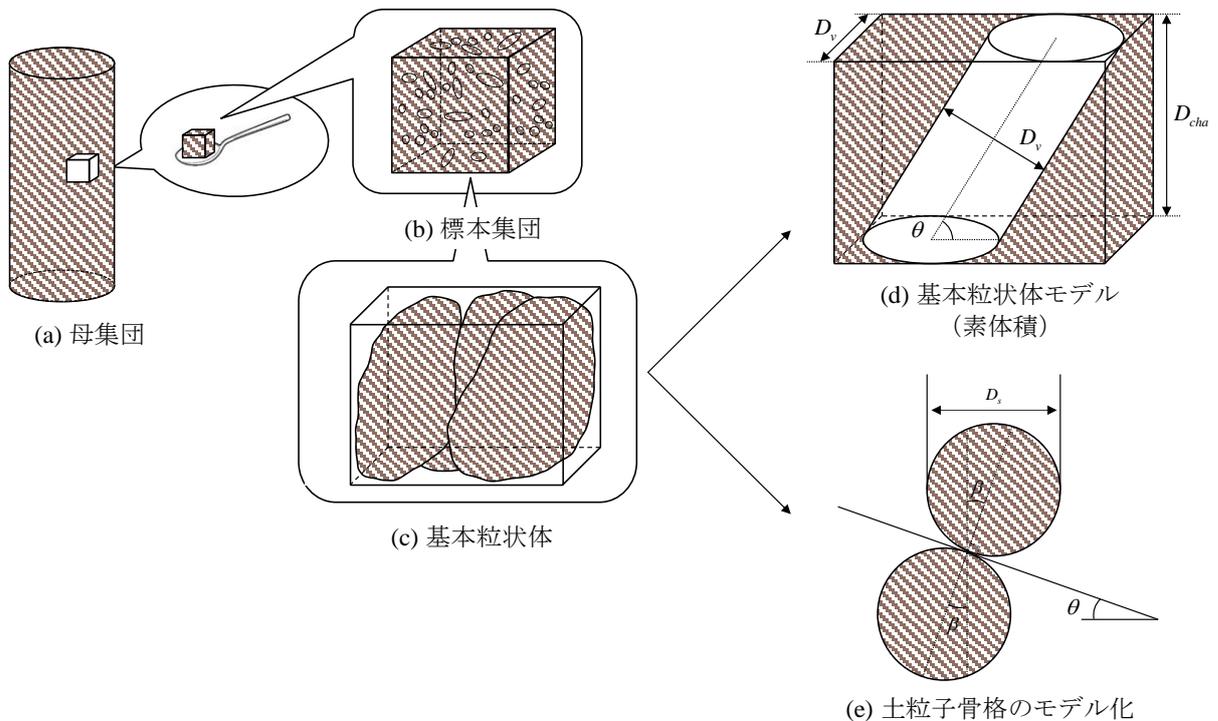


図 2.2.1 三軸供試体の母集団，標本集団，土粒子を含む微小要素

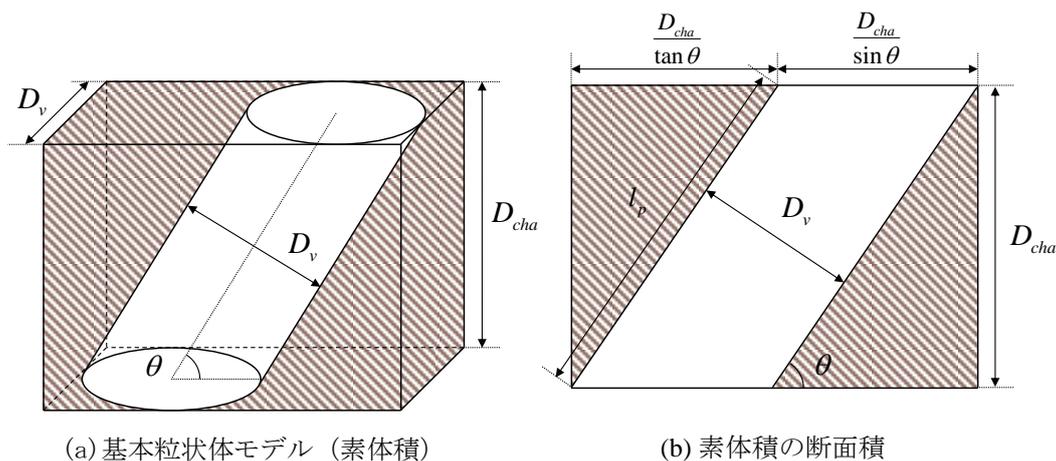


図 2.2.2 素体積の断面積

例えば、母集団を三軸試験の供試体サイズと想定する。三軸供試体（図 2.2.1 (a)）から抽出された立方体は標本集団（図 2.2.1 (b)）となり、間隙構造を対象とすると標本集団から抽出された 0～数個の土粒子からなる基本粒状体（図 2.2.1 (c)）、その基本粒状体をモデル化した基本粒状体モデル（図 2.2.1 (d)）が標本となり、これを素体積と呼ぶ。このとき、数個の土粒子からなる基本粒状体における間隙部分を管径  $D_v$ 、傾き  $\theta$  の円管にモデル化し、土粒子部分を円管以外の不透水性の固体にモデル化している。また、素体積の高さを  $D_{cha}$  としている。図 2.2.2 に、素体積の断面積を示す。素体積の体積  $V_e$  と円管部分の体積  $V_p$  は以下の式で表せる。

$$V_e = D_v \cdot \left( \frac{D_v}{\sin \theta} + \frac{D_{cha}}{\tan \theta} \right) \cdot D_{cha} \quad (2.2.1)$$

$$V_p = \pi \cdot \left( \frac{D_v}{2} \right)^2 \cdot \frac{D_{cha}}{\sin \theta} \quad (2.2.2)$$

ここに、 $V_e$ ：素体積の体積、 $V_p$ ：円管の体積、 $D_v$ ：管の直径、 $\theta$ ：円管の傾き、 $D_{cha}$ ：素体積高さ。

## 2.2.2 間隙モデルへの確率論の援用

間隙モデルでは図 2.2.2 (a)のように間隙を管径  $D_v$ 、傾き  $\theta$  の円管に、土粒子の実質部分を円管以外の不透水性の固体に置き換えている。土粒子の形状や大きさは不規則であるため、間隙部分は不規則な構造となっている。そこで、間隙モデルでは、円管の管径  $D_v$  と傾き  $\theta$  を確率変数とみなし、それらの確率密度関数を求めることで、間隙の不規則な構造を評価する。

### (1) 管径 $D_v$ の確率密度関数

間隙モデルでは粒径加積曲線と間隙比から管径の確率密度関数を算出する。一般的に土の粒径加積曲線の多くは対数正規分布に従うことが知られている<sup>3)</sup>ことから、粒径加積曲線の確率密度関数  $f(D_s)$  は次式で表せる。

$$f(D_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_s \cdot D_s} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln D_s - \lambda_s)^2}{2 \cdot \zeta_s^2} \right] \quad (2.2.3)$$

$$\lambda_s = \ln \mu_s - \frac{1}{2} \zeta_s^2 \quad (2.2.4)$$

$$\zeta_s^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_s^2}{\mu_s^2} \right) \quad (2.2.5)$$

ここに、 $D_s$  : 粒径、 $\mu_s$  : 粒径  $D_s$  の平均、 $\sigma_s$  : 粒径  $D_s$  の標準偏差、 $\lambda_s$ 、 $\zeta_s$  : 分布パラメータ。

宇野ら<sup>4)</sup>の間隙径分布の測定結果から、粒径加積曲線と間隙径分布に相関が見られたことを参考に、本モデルでは、間隙径分布もまた対数正規分布で近似している。管径  $D_v$  の確率密度関数  $f(D_v)$  は以下の式で表せる。

$$f(D_v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta_v \cdot D_v} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln D_v - \lambda_v)^2}{2 \cdot \zeta_v^2} \right] \quad (2.2.6)$$

$$\lambda_v = \ln \mu_v - \frac{1}{2} \zeta_v^2 \quad (2.2.7)$$

$$\zeta_v^2 = \ln \left( 1 + \frac{\sigma_v^2}{\mu_v^2} \right) \quad (2.2.8)$$

ここに、 $D_v$  : 管径、 $\mu_v$  : 管径  $D_v$  の平均、 $\sigma_v$  : 管径  $D_v$  の標準偏差、 $\lambda_v$ 、 $\zeta_v$  : 分布パラメータ。

ここで、管径  $D_v$  の確率密度関数  $f(D_v)$  を本モデルにおける間隙径分布と定義しており、確率密度関数  $f(D_v)$  の未知パラメータ  $\sigma_v$ 、 $\mu_v$  は以下の3つの仮定により、粒径加積曲線と間隙比より決定される。

$$D_{cha} = D_{10} \quad (2.2.9)$$

$$\mu_v = D_{cha} \cdot P_{ss} \quad (2.2.10)$$

$$\delta = \frac{\sigma_s}{\mu_s} = \frac{\sigma_v}{\mu_v} \quad (2.2.11)$$

ここで、 $P_{ss}$  : 間隙比の実験値と素体積から計算される間隙比を一致させるためのパラメータ、 $D_{cha}$  : 素体積高さ、 $\delta$  : 変動係数。

なお、 $D_{10}$  (10%粒径) が透水係数に影響する<sup>5)</sup>といわれていることから、素体積高さ  $D_{cha}$  を  $D_{10}$  と仮定している (式 (2.2.9))。また、宇野ら<sup>4)</sup>の試験結果において、間隙径分布は粒径加積曲線を平行移動させたような形状となっていることから、粒径の確率密度関数の変動係数と間隙径分布の確率密度関数の変動係数は等しいと仮定している (式 (2.2.11))。本モデルは、粒径加積曲線を対数正規分布で近似することを前提としているため、粒径加積曲線を対数正規分布で近似できる土質に対して適用可能であると考えられる。

(2) 円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数

Kitamura は Oda<sup>6)</sup>による接触する 2 つの粒子の接点角の観察結果を基に，図 2.2.1 (e)に示す接点角  $\beta$  の確率密度関数を五角形に近似した．(図 2.2.3) 以下に接点角  $\beta$  の確率密度関数  $f(\beta)$  を示す．

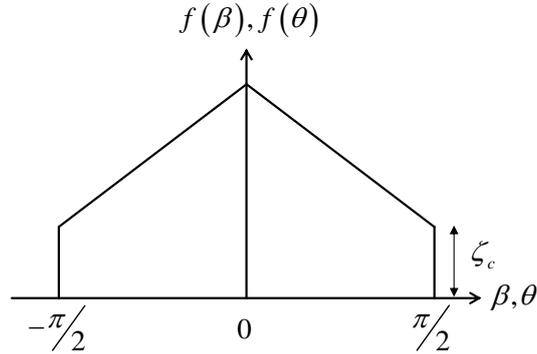


図 2.2.3 接点角  $\beta$  と基本粒状体内の水が流れる支配的な角度  $\theta$  の確率密度関数

$$f(\beta) = \begin{cases} \frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \beta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (-\pi/2 \leq \beta \leq 0) \\ -\frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \beta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (0 \leq \beta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (2.2.12)$$

図 2.2.1 (c)に示す基本粗粒状体中の水の流れを考えると，図 2.2.1 (e)に示すように，2 つの粒子の接平面に平行な方向が支配的であると考えられる．よって，図 2.2.1 (d)に示す素体積中の円管の傾き  $\theta$  で表せられる水の流れの支配的方向は，接平面と一致する．また，図 2.2.1 (e)より接点角  $\beta$  と円管の傾き  $\theta$  には相関があるため，円管の傾き  $\theta$  もまた五角形の確率密度関数と仮定している．よって，円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数は以下の式で表せる．

$$f(\theta) = \begin{cases} \frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (-\pi/2 \leq \theta \leq 0) \\ -\frac{2/\pi - 2 \cdot \zeta_c}{\pi/2} \cdot \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (0 \leq \theta \leq \pi/2) \end{cases} \quad (2.2.13)$$

ここに， $\zeta_c$  :  $\theta$  の確率密度関数の最低値．

$\zeta_c$  については，図 2.2.3 の五角形分布の最低高さと最大高さの比を 1 : 3 と仮定し，五角形分布の面積を 1 として計算すると  $\zeta_c = 0.159$  となる．

### 2.2.3 間隙比の算定

間隙比  $e$  は土粒子部分の体積に対する土の間隙の体積の比率である．これを間隙モデルで考えると，素体積の土粒子に相当する不透水性の部分の体積と，間隙を表す円管の体積の比で表せることから間隙比は以下の式で表せる．

$$e = \frac{\text{円管の体積}}{\text{不透水部分の体積}} = \frac{V_p}{V - V_p} \quad (2.2.14)$$

ここに、 $V$ ：素体積の体積.

間隙モデルでは、管径  $D_v$  と円管の傾き  $\theta$  を確率変数とみなしているため、様々な形状や大きさの円管を持つ素体積の平均値（期待値）が間隙モデルにおける間隙比である。よって、素体積の間隙比は以下の式で表せる。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V - V_p} f(D_v) f(\theta) d\theta dD_v \quad (2.2.15)$$

## 2.2.4 サクシヨンの算定

サクシヨンは、次式のように間隙空気圧  $u_a$  と間隙水圧  $u_w$  の差として定義される。

$$s_u = u_a - u_w \quad (2.2.16)$$

一般に、間隙空気圧  $u_a$  は大気圧と等しい。大気圧を基準（ゼロ）とすると不飽和土中の間隙水圧  $u_w$  は負となり、サクシヨンは間隙水圧の絶対値に等しくなる。サクシヨンは土粒子と間隙流体の間の物理・化学的作用による吸着力や間隙水の表面張力によるマトリックサクシヨンと浸透圧サクシヨンに分けられる。間隙モデルではマトリックサクシヨンが得られるものと考えられる。

図 2.2.4 は、水槽に毛細管を立てたときに生じる毛細管現象を表したものである。図に示されるように毛細管内のメカニカスの上昇が止まり、水面が平衡しているとき、式 (2.2.17) に示すように毛細管内の内壁とメニスカスが接触した部分に作用する表面張力と水槽の水面よりも高い位置にある毛細管内の水の重量が釣り合っている。

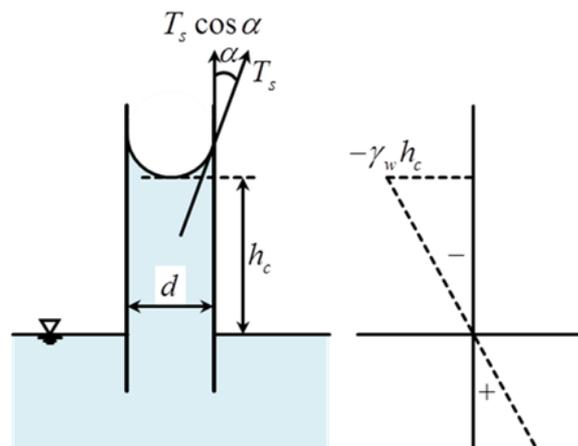


図 2.2.4 毛管現象

$$\pi \cdot d \cdot T_s \cdot \cos \alpha = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot h_c \cdot \gamma_w \quad (2.2.17)$$

ここに、 $d$ ：毛細管の直径（水分を保持している円管の最大管径）、 $T_s$ ：水の表面張力、 $\alpha$ ：毛細管の内壁とメニスカスの接触角、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、 $h_c$ ：毛管上昇高さ。

毛細管の内壁とメニスカスの接触角 $\alpha$ は非常に小さい角度であり、ぬれた毛細管では $\alpha \approx 0$ であるため本モデルでは $\alpha=0$ としている。

式(2.2.17)より毛管上昇高さ $h_c$ は以下の式となる。

$$h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot d} \quad (2.2.18)$$

メニスカス部分のサクションは、毛管上昇高さに相当する水圧に等しいことから、毛管上昇高さ $h_c$ に水の単位体積重量を乗じればよいので、次式となる。

$$s_u = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (2.2.19)$$

## 2.2.5 体積含水率の算定

体積含水率 $W_v$ は次式で表せる。

$$W_v = \frac{V_w}{V} \quad (2.2.20)$$

ここに、 $V_w$ ：間隙水の体積、 $V$ ：全体の体積。

式(2.2.20)を間隙モデルから得られた間隙比（式(2.2.15)）を用いて、飽和時の体積含水率 $W_{v\max}$ は次式のように表せる。

$$W_{v\max} = \frac{e}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V - V_p} \cdot f(D_v) \cdot f(\theta) d\theta dD_v \quad (2.2.21)$$

また、不飽和状態の体積含水率 $W_v$ は以下の式となる。

$$W_v = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V - V_p} \cdot f(D_v) \cdot f(\theta) d\theta dD_v \quad (2.2.22)$$

ここに、

$$d = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot h_c} = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{s_u} \quad (2.2.23)$$

ここで、不飽和土中の毛細管現象を考えると、大きな間隙部分よりも小さな間隙部分で間隙水は保持されやすい。そこで、式(2.2.22)の管径の積分範囲は、0 から  $d$  (水分を保持している円管の最大管径) とする。また、土が飽和した場合、式(2.2.22)より、毛管上昇高さ  $h_c$  が 0 となり、 $d$  が  $\infty$  となることから、式(2.2.21)と式(2.2.22)は等しくなる。含水比、飽和度は以下の式となる。

$$w = \frac{(1+e) \cdot \gamma_w \cdot W_v}{\gamma_s} (\times 100\%) = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V - V_p} \cdot f(D_v) \cdot f(\theta) d\theta dD_v (\times 100\%) \quad (2.2.24)$$

$$s_r = \frac{1+e}{e} \cdot W_v (\times 100\%) = \frac{1}{e} \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot f(D_v) \cdot f(\theta) d\theta dD_v (\times 100\%) \quad (2.2.25)$$

ここに、 $\gamma_s$  : 土粒子の単位体積重量。

## 2.2.6 不飽和透水係数の算定

間隙モデルにおける円管内の流れは、定常な層流であると仮定すると、流速分布は図 2.2.5 に示すような放物面となる。このような流れを Hagen-Poiseuille 流れという。円管の管径  $D_v$  に対して、管径の中心から  $R$  だけ離れた点における流速  $v$  は次式のようになる。

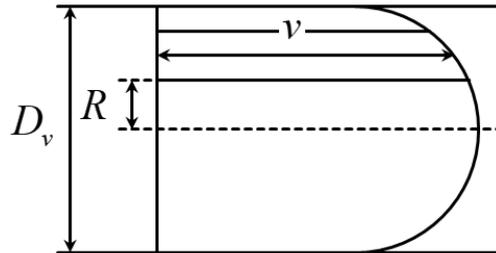


図 2.2.5 Hagen-Poiseuille 流れ

$$v = \frac{\gamma_w}{4 \cdot \mu} \cdot i \cdot \left\{ \left( \frac{D_v}{2} \right)^2 - R^2 \right\} \quad (2.2.26)$$

ここに、 $i$  : 円管内の動水勾配、 $\mu$  : 水の粘性係数、 $\gamma_w$  : 水の単位体積重量。

式(2.2.26)の流速  $v$  を円管の全断面積にわたって積分すると、円管内の単位時間当たりの流速  $Q_p$  が次式で求まる。

$$Q_p = \frac{\gamma_w}{8 \cdot \mu} \cdot \left( \frac{D_v}{2} \right)^2 \cdot i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_v^2 \quad (2.2.27)$$

ここで、図 2.2.2 (a)に示す素体積中の円管内を流れる層流に対する動水勾配は、次式のように定義される。

$$i = \frac{\Delta u / \gamma_w}{L} = \frac{\Delta u / \gamma_w}{D_{cha} / \sin \theta} \quad (2.2.28)$$

ここに、 $\Delta u$  : 素体積上下面での間隙水圧の差、 $L$  : 円管の長さ、 $D_{cha}$  : 素体積高さ、 $\theta$  : 円管の傾き。

よって、式に式を代入すると、素体積中の円管を流れる単位時間当たりの流量  $Q_p$  は、次式のようになる。

$$Q_p = \frac{D_v^4 \cdot \sin \theta \cdot \Delta u \cdot \pi}{128 \cdot \mu \cdot D_{cha}} \quad (2.2.29)$$

一方、図 2.2.1 (c)に示す、基本粒状体を通過する単位時間当たりの流量  $Q_c$  を Darcy 則で表現すると、次式のようになる。

$$Q_c = k \cdot \bar{i} \cdot A \quad (2.2.30)$$

ここに、 $k$  : 透水係数、 $A$  : 素体積の断面積、 $\bar{i}$  : 図 2.2.1 (c)に示す基本粒状体に対する平均的な動水勾配。

素体積の断面積  $A$  と図 2.2.1 (c)に示す、基本粒状体に対する平均的な動水勾配  $\bar{i}$  は、それぞれ次式のようになる。

$$A = D_v \cdot \left[ \frac{D_v}{\sin \theta} + \frac{D_{cha}}{\tan \theta} \right] \quad (2.2.31)$$

$$\bar{i} = \frac{\Delta u / \gamma_w}{D_{cha}} \quad (2.2.32)$$

式 (2.2.30)に式 (2.2.31)と式 (2.2.32)を代入すると、基本粒状体を通過する単位時間当たりの流量  $Q_c$  が次式のように表せる。

$$Q_c = k \cdot \frac{\Delta u / \gamma_w}{D_{cha}} \cdot D_v \cdot \left[ \frac{D_v}{\sin \theta} + \frac{D_{cha}}{\tan \theta} \right] \quad (2.2.33)$$

ここで、素体積中の円管内を流れる単位時間当たりの流量  $Q_p$  と基本粒状体を通過する単位時間当たりの流量  $Q_c$  は等しいので、式 (2.2.29)と式 (2.2.33)から透水係数  $k$  が次式のようになる。

$$k = \frac{\gamma_w \cdot D_v^3 \cdot \pi \cdot \sin \theta}{128 \cdot \mu \cdot \left[ \frac{D_v}{\sin \theta} + \frac{D_{cha}}{\tan \theta} \right]} \quad (2.2.34)$$

また、円管の管径  $D_v$  と傾き  $\theta$  が確率変数であることを考慮すると、透水係数  $k$  は次式のようになる。

$$k = \int_0^d \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\gamma_w \cdot D_v^3 \cdot \pi \cdot \sin \theta}{128 \cdot \mu \cdot \left[ \frac{D_v}{\sin \theta} + \frac{D_{cha}}{\tan \theta} \right]} \cdot f(D_v) \cdot f(\theta) d\theta dD_v \quad (2.2.35)$$

積分範囲  $d$  が有限の場合は不飽和透水係数となり、 $d$  が  $\infty$  の場合は飽和透水係数となる。

### 2.3 間隙モデルの計算過程

間隙モデルを用いて得られる水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数の数値計算手順を図 2.3.1 に示す。まず、粒径加積曲線のデータから、最小二乗法を用いた非線形回帰分析を行い、粒径  $D_s$  の平均  $\mu_v$  と標準偏差  $\sigma_s$  を求める (図 2.3.1 の①)。式 (2.2.9)、式 (2.2.10)、式 (2.2.11) に示す 3 つの仮定と式 (2.2.7)、式 (2.2.8) から管径  $D_v$  の自然対数  $\ln D_v$  の平均  $\lambda_v$  と標準偏差  $\zeta_v$  を求める (図 2.3.1 の②)。得られた  $\lambda_v$  と  $\zeta_v$  を用いて、式 (2.2.6) に示す円管  $D_v$  の確率密度関数を求める (図 2.3.1 の③)。式 (2.2.13) に示す円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数  $P_c(\theta)$  を求める (図 2.3.1 の④)。以上の手順により求めた管径  $D_v$  と円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数を用いて、式 (2.2.15) に示す間隙比が計算され (図 2.3.1 の⑤)、間隙比の実測値と計算値が等しいかどうか検討される (図 2.3.1 の⑥)。間隙比と実測値が等しくない場合、式 (2.2.10) 中の間隙比を合わせるためのパラメータ  $P_{SS}$  を変化させ (図 2.3.1 の⑦)、図 2.3.1 の②～⑤の一連の計算を繰り返し、間隙比の実測値と計算値が等しくなるまで繰り返す。そして、実測の間隙比の値を表現できる間隙径分布が得られる。式 (2.2.21) から飽和時の体積含水率  $W_{vmax}$  が求められる (図 2.3.1 の⑧)。体積含水率 0% から飽和時の体積含水率  $W_{vmax}$  まであるステップ (間隔) で刻む。式 (2.2.22) で計算した値が、各ステップの体積含水率と等しくなるまで式中の管径  $D_v$  の積分範囲を徐々に大きくしていく。管径  $D_v$  の積分範囲が大きくなることで計算される体積含水率の値が大きくなる。式 (2.2.22) の計算結果と各ステップの体積含水率がほぼ等しくなった時、管径  $D_v$  の積分範囲の最大値が、各ステップの体積含水率に対応した間隙水を保持する円管の最大管径  $d$  となる (図 2.3.1 の⑨)。求められた各ステップの体積含水率に対応した間隙水を保持する円管の最大管径  $d$  を水頭 (式 (2.2.18))、サクション (式 (2.2.19)) や不飽和・飽和透水係数 (式 (2.2.35)) の式に代入することで、各ステップに対応した水頭、サクションおよび不飽和・飽和透水係数が得られる (図 2.3.1 の⑩)。

以上の手順を用いることによって、体積含水率 (または、飽和度) -サクション関係 (水分特性曲線) と体積含水率 (または、飽和度) -不飽和・飽和透水係数関係が得られる。

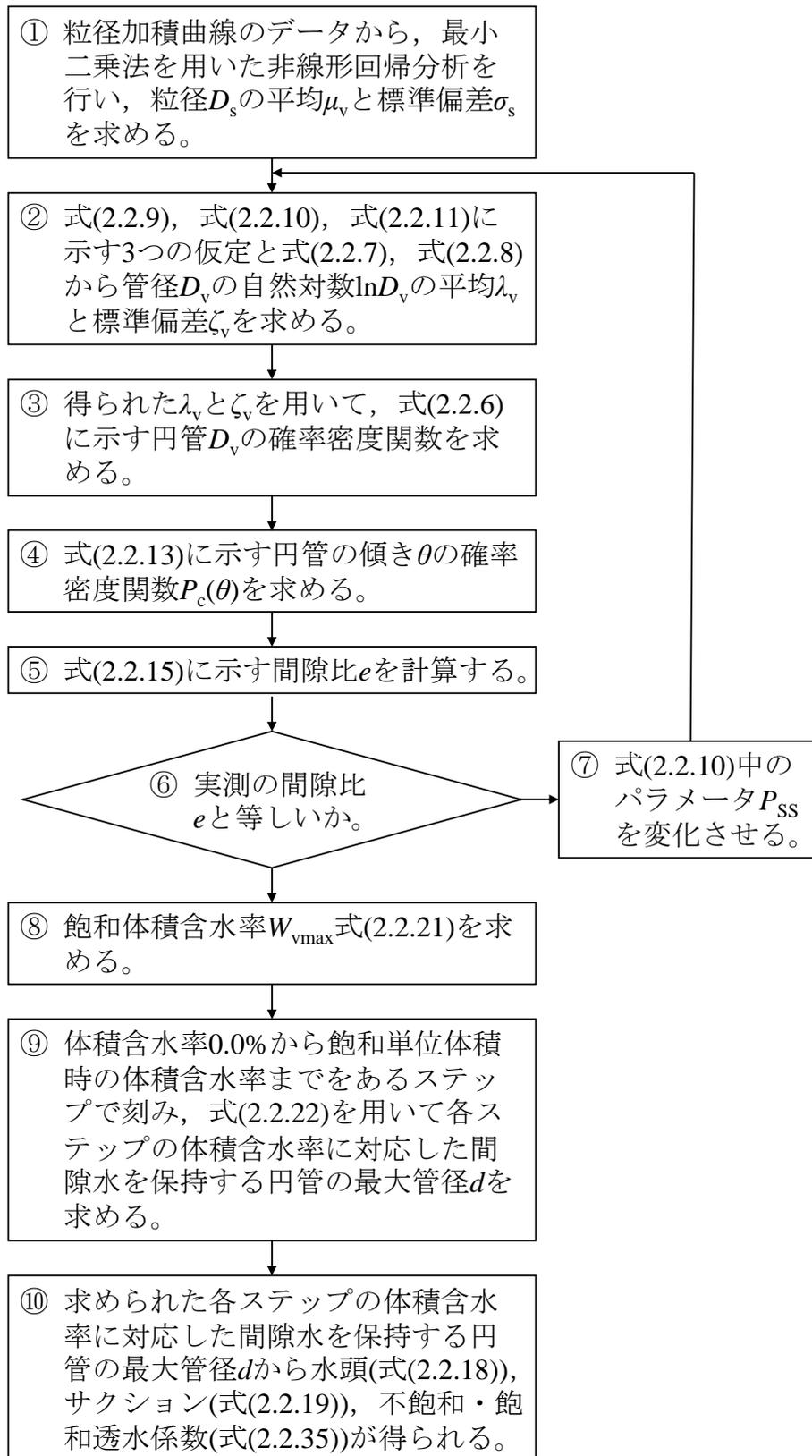


図 2.3.1 間隙モデルの計算過程

## 参考文献

- 1) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, J. and Seyama, M: A numerical model for seepage through un-saturated soil, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 4, pp.261-265, 1998.
- 2) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 3) 堀川清司：新編海岸工学，東京大学出版，pp. 239-242，1991.
- 4) 宇野尚雄，神谷浩二，田中宏路：「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布，土木学会論文集，No.603，III-44，pp. 35-44，1998.
- 5) Hazen, A.: Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to Their Use in Filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, pp.539-556, 1983.
- 6) Oda, M.: Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, *Soils and Foundations*, Vol. 12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 7) Kitamura, R.: A Markov model of particulate material with an isotropic fabrics, *Proceedings of the International Conference on Numerical Methods in Engineering*, pp.455-464, 1985.

## 第3章 土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出に関する検討 (Case1)

### 3.1 本章の概要

本章では、土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出方法について検討する。まず、Sako and Kitamura<sup>1)</sup>が提案する保水性試験結果から算出される間隙径分布の逆算値と、その逆算値から得られるサクシオンに寄与する間隙径分布の導出方法について整理する。また、元の間隙径分布とサクシオンに寄与する間隙径分布から得られる平行移動指数と、粒度特性値との関係性について再検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出するための導出式を提案し、その精度について明らかにする。また、各サクシオンにおけるサクシオンに寄与する間隙水の割合を寄与率として提案し、各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について考察した。

### 3.2 Sako and Kitamura (2006)による平行移動指数の提案

#### 3.2.1 間隙モデルによる計算結果と保水性試験結果の比較

初めに、2章で述べた間隙モデルの計算過程から算出された計算結果と保水性試験結果の比較について述べる。本項では、鹿児島県の串良川流域の河川堤防の築堤試料として用いられる試料（以下、串良土）( $\rho_s = 2.48 \text{ Mg/m}^3$ )を用いる。簡易蒸発法（UMS社、HYPROP）を用いた保水性試験を実施し、計算結果との比較に用いている。簡易蒸発法は、Shindler<sup>2)</sup>の方法に基づいた、土の水分特性曲線と不飽和透水係数を同時に測定することができる方法である。供試体内に2本の高さの異なるテンシオメータで、2店の間隙水圧を測定し、供試体の重量を電子天秤で測定することで、供試体内の平均的な含水比を得ることができる。これにより、水分特性曲線を得ることができる。また、供試体内の上端から水分が蒸発するため、下端から上端への水の流れが生じる。電子天秤で測定された質量損失により蒸発量が測定されることから、蒸発量を流量とし、ダルシー則によって不飽和透水係数が求められる。本試験では、簡易蒸発法で得られた水分特性曲線（4点）のみを用いている。

表 3.2.1 に間隙モデルの入力パラメータを示す、また、図 3.2.1 に串良土の粒径加積曲線と、図 3.2.2 に簡易蒸発法より得られた水分特性曲線 ( $e = 1.05$ ) を示す。

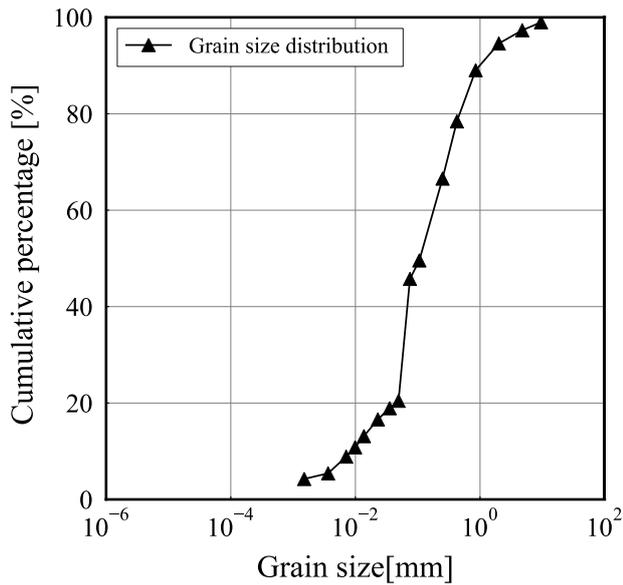


図 3.2.1 粒径加積曲線（串良土）

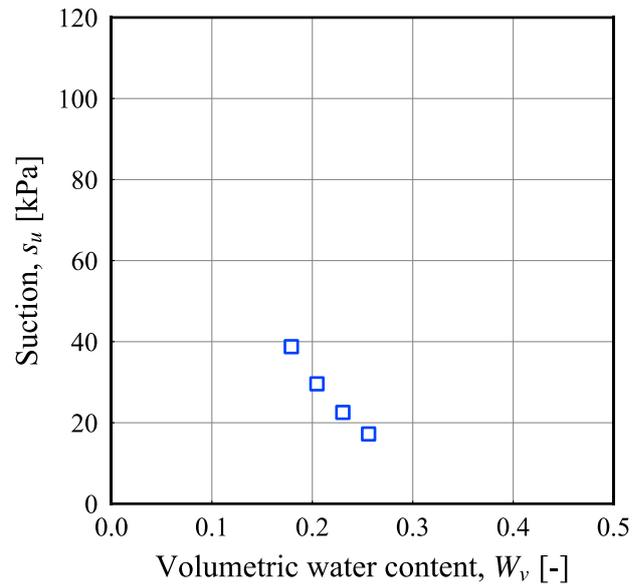


図 3.2.2 水分特性曲線

図 2.3.1 に示す計算過程により，算出された対数正規分布で近似されたと粒径加積曲線（GSD）と間隙径分布（PSD）を図 3.2.3 に示す．間隙径分布は式 (2.2.6)，式 (2.2.7)，式 (2.2.8) の管径  $D_v$  の確率密度関数の累積分布関数である．宇野ら<sup>3)</sup>の試験結果を基に，粒径加積曲線は間隙径分布を平行移動したような形状と仮定しており，粒径加積曲線の確率密度関数と間隙径分布の変動係数は等しいと仮定している．

図 3.2.4 に間隙径分布から得られた水分特性曲線と保水性試験結果を示す．図に示すように，保水性試験結果よりも計算結果が過小評価される傾向にある．そこで，モデルの推定精度を向上させるためにモデルの改良を行う必要がある．

表 3.2.1 間隙モデルの入力パラメータ (串良土)

土粒子密度 [ $\text{Mg/m}^3$ ]	2.48
間隙比	1.05
水の表面張力 [ $\text{N/m}$ ] [ $15^\circ\text{C}$ ]	$73.48 \times 10^{-3}$
粒径加積曲線	
粒径 [mm]	通貨質量百分率 [%]
9.5	98.98
4.75	97.32
2	94.58
0.85	89.02
0.425	66.55
0.106	49.58
0.075	45.75
0.049	20.46
0.035	18.92
0.023	16.6
0.014	13.13
0.01	10.81
0.007	8.88
0.004	5.41
0.002	4.25

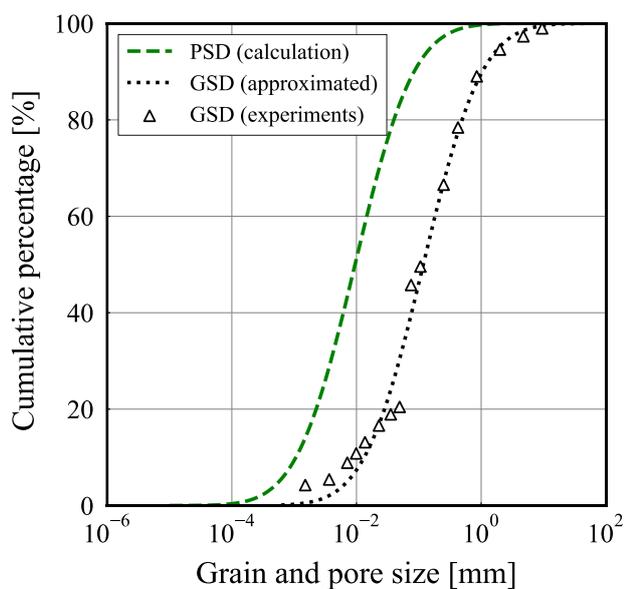


図 3.2.3 粒径加積曲線と間隙径分布 (串良土)

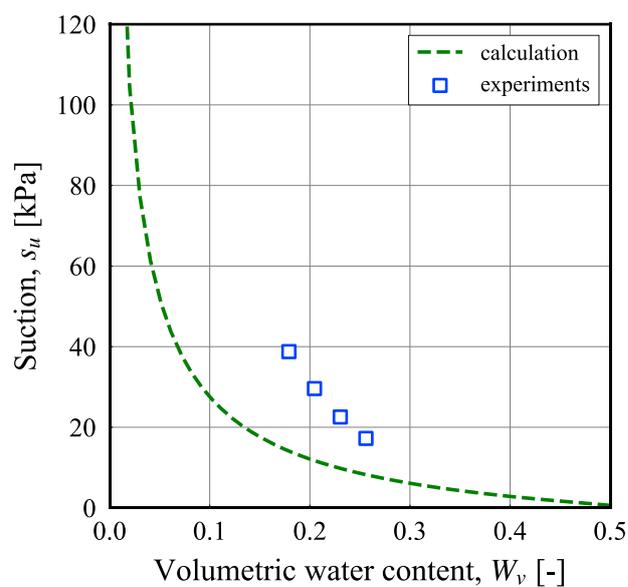


図 3.2.4 水分特性曲線 (串良土)

### 3.2.2 水分特性曲線のフィッティング方法と平行移動指数の提案

Sako and Kitamura<sup>1)</sup>は計算結果を実験結果に近づけるために、水分特性曲線のフィッティング方法と、それに伴って導出される平行移動指数  $I_{pi}[\%]$ を提案している。図 3.2.5 に、串良土の間隙径分布 (PSD) と、保水性試験結果から逆算された間隙径分布を示す。また、保水性試験結果から間隙径分布の逆算する方法を図 3.2.7 に示す。まず、式 (2.2.22)を用いて、試験結果の体積含水率に対応する間隙水を保持するために必要な円管の最大管径  $d$ を求め、得られた最大管径  $d$ と式 (2.2.6)を用いて、式 (3.2.1)に示す式より累積間隙体積百分率を求める。試験結果のサクションを式 (2.2.19)に代入することで、試験結果のサクションに対応する間隙水を保持するために必要な円管の最大管径  $d_{su}$ を求める。試験結果のサクションに対応する間隙水を保持するために必要な円管の最大管径  $d_{su}$ と累積間隙体積百分率  $F(D_v)$ の関係から逆算された間隙径分布が得られる。表 3.2.2 に串良土の水分特性曲線に対する、 $d(\text{mm})$ ,  $d_{su}(\text{mm})$ と累積間隙体積百分率  $F(D_v)$ を示す。

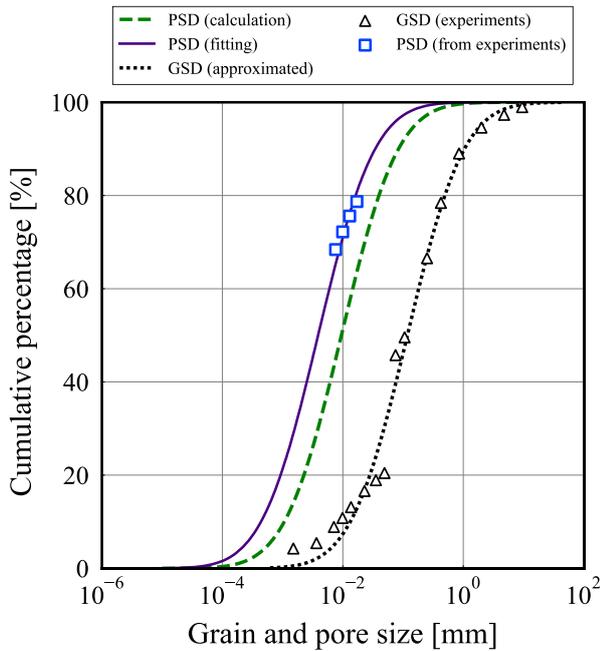


図 3.2.5 間隙径分布 (串良土)

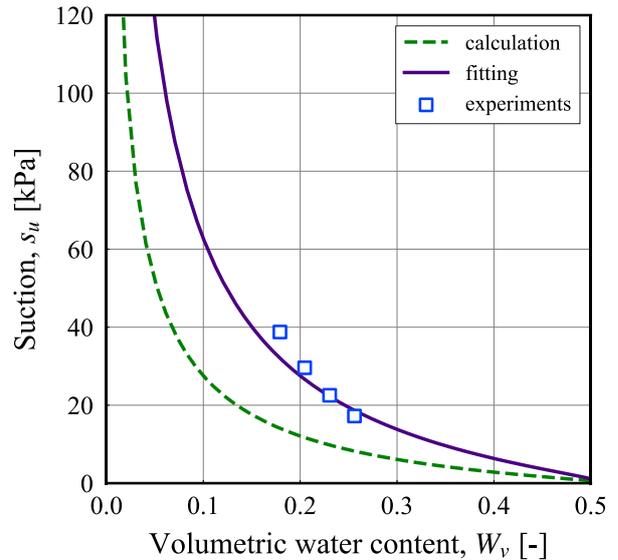


図 3.2.6 水分特性曲線 (串良土)

図 3.2.8 に、不飽和土中の間隙水と間隙空気の状態図を示す。不飽和土中の間隙水は、吸着水と自由水に分けられると考えられる。軽部ら<sup>4)</sup>は不飽和土中の間隙水の状態を吸着水、メニスカス水、バルク水に分けられると述べている。よって、吸着水は土粒子表面に固着している間隙水であり、自由水は土粒子接点のメニスカスを形成する自由水 (メニスカス水)、間隙を満たす自由水 (バルク水) となると考えられる。メニスカス水は土粒子接点とメニスカスを形成するため、比較的に移動が制限される間隙水であり、バルク水は比較的自由に移動することができる間隙水と考えられる。マトリックサクションは、土粒子間に働く表面張力に起因するため、土粒子接点に作用するメニスカス水の影響が強いと考えられる。このことからサクションには全ての間隙水ではなく一部の間隙水が寄与しているのではないかと考えた。図 3.2.5 に示す試験結果より逆算された間隙径のプロットは元の間隙径分布 (破線) よりも小さい値となっており、これは間隙水の一部がサクションに起因していることに対応する。そこで、逆算された間隙径に対して元の間隙径分布を平行移動させることで、水分特性曲線のフィッティングを行う。こ

のとき、逆算値に対して平行移動した間隙径分布をサクシヨンに寄与する間隙径分布と定義している。ここで元の間隙径分布は間隙構造内の全ての間隙水の体積を反映していると考えられ、サクシヨンに寄与する間隙径分布は、サクシヨンに寄与する一部の間隙水の体積を間隙径分布として換算するものである。また、本検討で用いている串良土のように水分特性曲線の試験結果が複数点ある場合、各試験値に対して平行移動量を算出し、その平均の平行移動量を用いている。図3.2.6にサクシヨンに寄与する間隙径分布から算出された水分特性曲線（実線）を示す。サクシヨンに寄与する間隙径分布から計算された水分特性曲線は保水性試験結果に近い値となる。ここで、サクシヨンに寄与する間隙径分布の累積間隙体積百分率 50%管径が元の間隙径分布の累積間隙体積百分率の何%に対応するかを算出し、それを平行移動指数  $I_{pt}$  (%)と定義している<sup>1)</sup>。串良土の平行移動指数は  $I_{pt} = 30.3\%$ と算出された。このように、平行移動指数が 50%より小さくなる場合、サクシヨンに寄与する間隙径分布の平均が元の間隙径分布よりも小さくなることを意味し、先述のように間隙水の一部がサクシヨンに起因することを意味する。このような計算過程により、試験結果の水分特性曲線に計算結果をフィッティングすることが可能となり、平行移動指数が算出される。

モデルの推定精度向上をおこない、実用化を図るためには保水性試験結果を用いることなく、サクシヨンに寄与する間隙径分布を算出し、水分特性曲線を推定する必要がある。そこで、平行移動指数と粒度特性値との関係について検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出する方法について議論する。

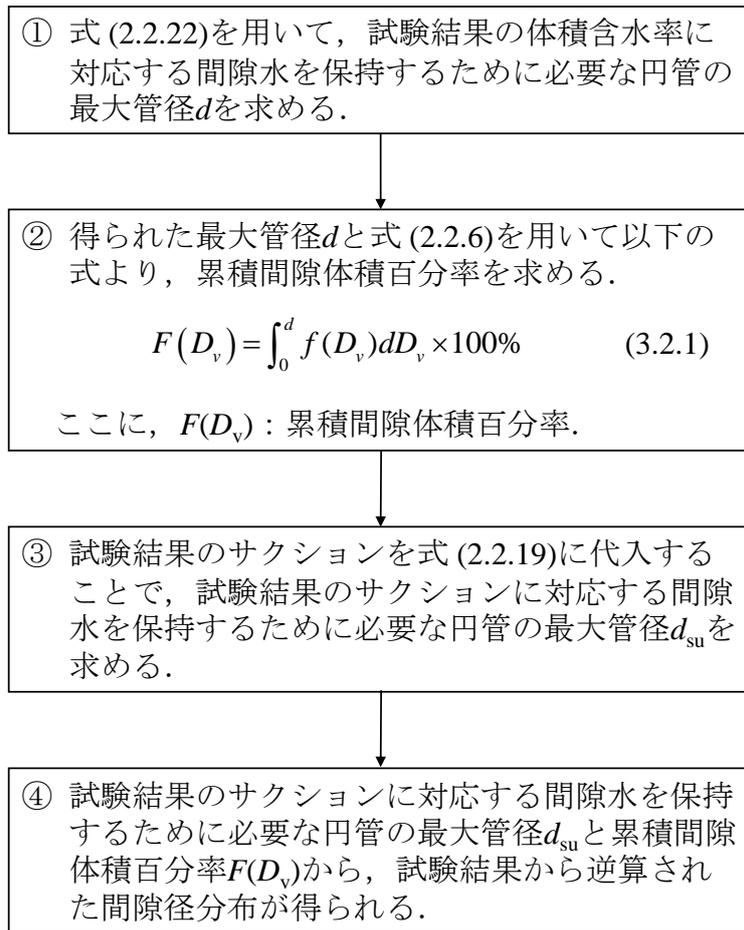


図 3.2.7 水分特性曲線の試験結果から間隙径分布を推定する方法

表 3.2.2 水分特性曲線と逆算された間隙径 (串良土)

サクション $s_u$ (kPa)	体積含水率 $W_v$	$d$ (mm)	$d_{su}$ (mm)	$F(D_v)$ (%)
17.2	0.26	0.036	0.017	78.3
22.5	0.23	0.030	0.013	75.2
29.6	0.21	0.025	0.010	71.7
38.8	0.18	0.021	0.008	67.9

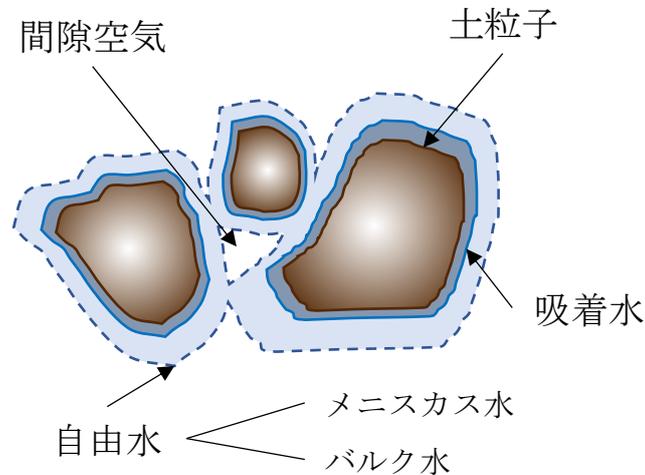


図 3.2.8 不飽和土中の間隙水と間隙空気概念図

### 3.3 平行移動指数と粒度特性値との関係

平行移動指数と均等係数は、均等係数を対数軸で表記することで、関係があることが明らかとなっている。しかし、ばらつきが大きく、粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式は提案されていない。また、モデルの保水性の推定精度について検討した事例はない。そこで、本検討では土質の工学的分類や試験方法の違いに着目し、粒度特性値（均等係数，細粒分含有率）から平行移動指数を求めるための近似式を提案する。

#### 3.3.1 本検討で用いる試料と保水性試験

間隙モデルは粗粒土を対象としているため、本検討では、火山灰質砂質土 30 試料と火山灰を含まない砂質土（以下、砂質土）12 試料の保水性試験結果を用いる。表 3.3.1 に本研究で用いた試料の土質の物性値，試験方法等を示す。土質の工学的分類<sup>5)</sup>に従って、火山灰質砂質土は SV, SV-G, SVG に分類され、砂質土は SF-G, SG-F, SFG に分類された。ここで、火山灰質砂質土の添え字の“V”は、火山灰質の細粒分を 5%以上含むことを意味しており<sup>5)</sup>、例えば粒径のみを考慮すると SV-G と SF-G は同じ土質分類に属する。保水性試験方法は、水頭法，加圧板法，遠心法，簡易蒸発法によって得られた排水過程の試験結果を用いている。簡易蒸発法を除く、水頭法，加圧板法，遠心法は地盤工学会基準土の保水性試験<sup>6)</sup>に従って実施された試験結果である。水頭法は吸引法に分類され、供試体内の空気圧を大気圧に保ちながら、水頭により負圧を与え平衡状態となるまで排水させ、供試体内の含水比と土中の水ポテンシャルを測定する方法である。加圧板法は加圧法に分類され、土中水の圧力を大気圧に保ちながら、供試体に正の空気圧を負荷させて平衡状態となるまで排水させ、供試体内の含水比と水ポテンシャルを測定する方法である。遠心法は、供試体を遠心力場におき、供試体の下端の排水面と同じポテンシャルを

持つ自由水面が存在するとみなし<sup>6)</sup>、その自由水面に対する供試体中央における化学ポテンシャルの低下量（土中水ポテンシャル）を測定する方法である。表に試験方法とその測定範囲を示す。吸引法と加圧法はマトリックポテンシャル（マトリックサクション）が測定されるが、遠心法は土中水ポテンシャル（トータルサクション）が測定されている。

表 3.3.1 本研究で用いた試料の物性値

No.	試料	土質分類	$\rho_s$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$U_c$	$F_c$ [%]	試験方法	$e$
1	Ito shiras-1	SV-G	2.52	26.4	21.1	水頭法	1.92
2						加圧板法	1.93
3	Ito shirasu-2	SV-G	2.55	50.3	27.1	水頭法	1.29
4						加圧板法	1.26
5	Ito shirasu-3	SV-G	2.51	35.5	26.7	水頭法	1.14
6						加圧板法	1.04
7	Ijyuin shirasu-1	SV	2.62	88.3	39.2	水頭法	1.46
8						加圧板法	1.69
9	Ijyuin shirasu-2	SV-G	2.44	59.9	31.4	水頭法	1.10
10						加圧板法	1.24
11	Ijyuin shirasu-3	SV-G	2.42	56.1	30.2	水頭法	1.12
12						加圧板法	1.27
13	Kihoku shirasu-1	SV-G	2.63	86.1	41.4	水頭法	1.76
14						加圧板法	1.71
15	Kihoku shirasu-2	SV-G	2.54	59.2	34.6	水頭法	1.46
16						加圧板法	1.75
17	Kihoku shirasu-3	SVG	2.46	33.6	27.6	水頭法	1.41
18						加圧板法	1.46
19	Mizobe shirasu	SV-G	2.49	83.1	32.2	水頭法	1.51
20						加圧板法	1.29
21	Yoshida shirasu-1	SV-G	2.58	48.2	29.2	水頭法	1.61
22						加圧板法	1.57
23	Yoshida shirasu-2	SVG	2.54	45.0	23.2	水頭法	1.35
24						加圧板法	1.50
25	Matsumoto shirasu-1	SV-G	2.45	11.1	21.8	加圧板法	1.57
26	Matsumoto shirasu-2	SV	2.40	10.1	21.6	水頭法	1.44
27	Shirasu	SV	2.52	53.9	41.3	水頭法	1.14
28						遠心法	1.14
29	Sendai shirasu	SV-G	2.45	23.1	23.4	加圧板法	1.46
30	Kushira shirasu	SV-G	2.48	13.7	45.8	簡易蒸発法	1.05
31	Kumanotaira-1	SFG	2.69	65	23.8	水頭法	1.01
32	Kumanotaira-2	SFG	2.67	93.2	26.5	水頭法	2.06
33	Kumanotaira-4	SFG	2.66	91.5	26.9	水頭法	2.75
34	Kumanotaira-5	SF-G	2.79	14.7	16.7	水頭法	2.71
35	Kumanotaira-6	SFG	2.70	86	26.3	水頭法	2.96
36	Kumanotaira-7	SFG	2.56	135	29.2	水頭法	3.01
37	Kumanotaira-8	SG-F	2.47	12.4	8.1	水頭法	1.92
38	Kumanotaira-9	SFG	2.62	45.2	17.3	水頭法	1.72
49	Kumanotaira-10	SF-G	2.52	37.8	41.3	水頭法	2.78
40	Kumanotaira-11	SFG	2.60	24.9	19.6	水頭法	1.94
41	Masado	SF-G	2.67	85.9	49.3	水頭法	0.71
42						遠心法	0.71

表 3.3.2 保水性試験方法と測定範囲<sup>6)</sup>

試験方法		測定するポテンシャル	ポテンシャル測定範囲 (kPa)
吸引法	水頭法	マトリックポテンシャル	-1.0 ~ -30
	減圧法		-1.0 ~ -50
加圧法	加圧板法		-1.0 ~ -1500
	加圧膜法		-1.0 ~ -1500
遠心法		土中水のポテンシャル	-1.0 ~ -1500

### 3.3.2 粒度特性値と平行移動指数との関係

本検討では、細粒分含有率 ( $F_c$ ) と均等係数 ( $U_c$ ) と平行移動指数の関係について検討する。細粒分含有率は細粒分 ( $F_c$ ) (0.075 mm 未満) が占める割合であり、粒径加積曲線から得られる。均等係数 ( $U_c$ ) は  $D_{60}$  (60%粒径) と  $D_{10}$  (10%粒径) の比で定義されている。本研究では、対数正規分布で近似された粒径加積曲線より、 $D_{60}$  (60%粒径) と  $D_{10}$  (10%粒径) をもとめることで、均等係数を算出している。

各保水性試験結果を基に、サクシオンに寄与する間隙径分布を算出し、平行移動指数を算出した。図 3.3.1、図 3.3.2 に粒度特性値 (細粒分含有率、均等係数) と平行移動指数の関係を示す。

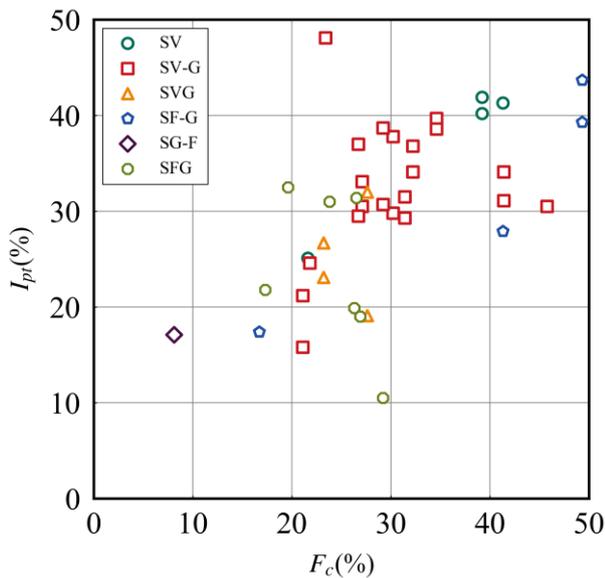


図 3.3.1 平行移動指数と細粒分含有率の関係

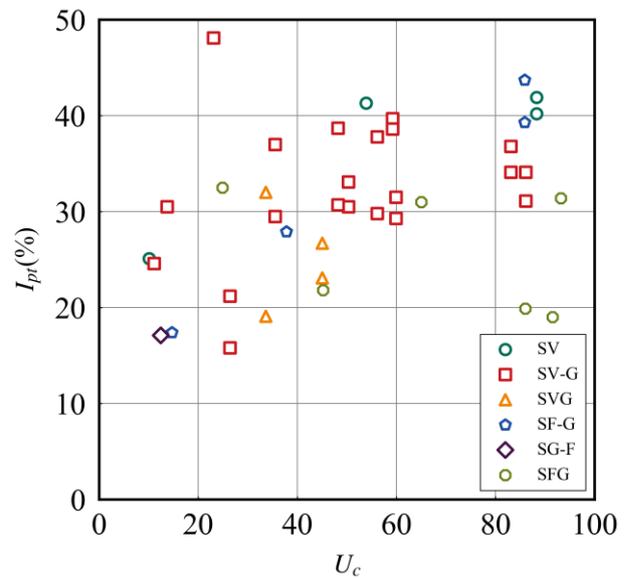


図 3.3.2 平行移動指数と均等係数の関係

平行移動指数と細粒分含有率の関係に着目すると、細粒分含有率が高い土質は平行移動指数も大きくなるように見えるが、ばらつきが大きい。平行移動指数と均等係数の関係に着目すると、均等係数が高い土質は平行移動指数も大きくなる傾向があるが、細粒分含有率の関係性と同様にばらつきが大きいことがわかる。この要因としては試験方法の違いや、試験条件が一致していないなどが考えられる。表 3.3.2 に示すように、試験方法による測定範囲の違いや、測定するポテンシャルの違いが影響を及ぼしている可能性がある。また、特に砂質土データがばらついている要因としては、試験データが少ないことが考えられる。これらの要因を踏まえ、火山灰質砂質土を対象を絞り込み、試験方法はマトリックポ

テンシヤルが得られている水頭法と加圧板法の試料を用いて再度検討を行った。

本検討では、試料 No.1～No.24 の火山灰質砂質土 24 試料を用いた (表 3.3.1)。この 24 試料の水分特性曲線は加圧板法と水頭法によって得られており、サクシヨンの設定が等しい試験結果である。図 3.3.3 に 24 試料の保水性試験結果を示す。水頭法はサクシヨン 0.98kPa, 1.96kPa, 4.90kPa であり、加圧板法はサクシヨン 4.91kPa, 9.81kPa, 49.2kPa である。また、先述のように加圧法と吸引法の測定方法が異なることや、供試体の作製条件や試験条件によって試験結果が必ずしも一致するとは限らないが、両者の試験結果は平衡状態の試験結果であり、加圧法と吸引法の試験結果の比較<sup>9)</sup>において、本検討で用いるサクシヨンの範囲では、加圧法と吸引法の試験結果の傾向は近いいため、同様の試験結果とみなして検討する。

図 3.3.4, 図 3.3.5 に 24 試料の粒度特性値と平行移動指数の関係を示す。図 3.3.4 の細粒分含有率と平行移動指数の関係に着目すると、細粒分含有率が多い土質ほど、平行移動指数が大きくなる傾向にある。これは、細粒分が多い土質ほど、間隙水の多くが保水性に寄与していることを示唆している。図 3.3.5 に示す、均等係数と平行移動指数の関係に着目すると、均等係数が多い土質ほど平行移動指数大きくなる傾向が見られる。いずれの関係も、ややばらつきが大きい。細粒分含有率と平行移動指数の関係では相関係数が  $r = 0.67$ 、均等係数と平行移動指数の関係では相関係数  $r = 0.62$  となった。また無相関検定を実施したところ、両者の関係とも有意な相関 ( $p < 0.01$ ) があることが示された。また、水頭法と加圧板法の試験結果は、細粒分含有率や均等係数が大きくなるにつれて、平行移動指数も大きくなる傾向が得られたため、試験方法による違いは小さいと推察される。

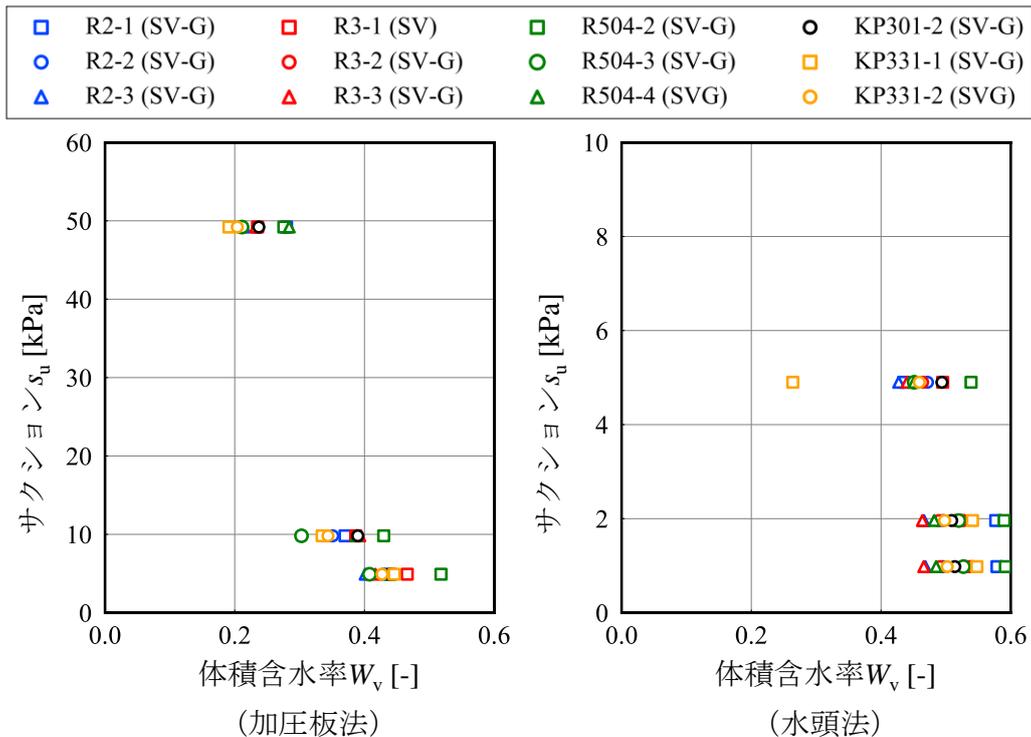


図 3.3.3 24 試料の水分特性曲線

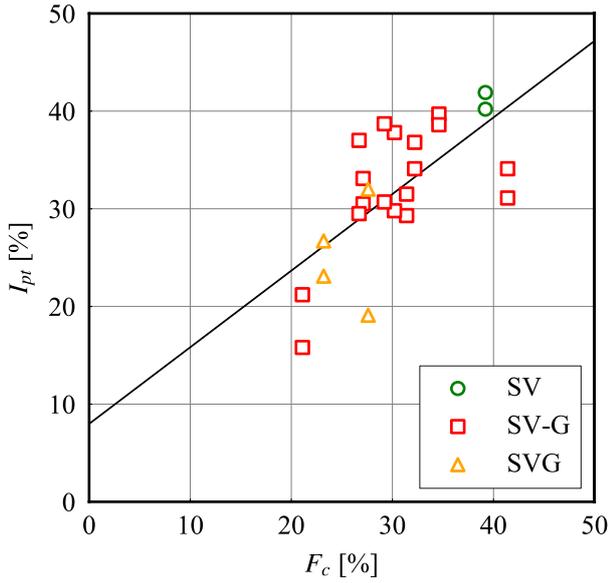


図 3.3.4 平行移動指数と細粒分含有率の関係

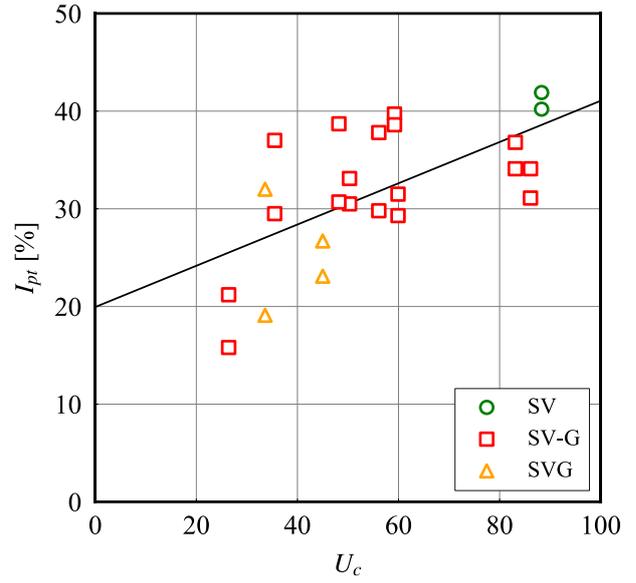


図 3.3.5 平行移動指数と均等係数の関係

本検討では、粒度特性値から平行移動指数を算出し、サクシヨンに寄与する間隙径分布を推定することを目的としているため、最も簡易な線形回帰による近似式をそれぞれ導出した（図 3.3.4，図 3.3.5）。平行移動指数と細粒分含有率からは以下の式が導出された。

$$I_{pt} [\%] = 0.78F_c [\%] + 7.98 \quad (3.3.1)$$

平行移動指数と均等係数からは以下の式が導出された。

$$I_{pt} [\%] = 0.21U_c + 19.9 \quad (3.3.2)$$

ただし、それぞれ  $F_c > 20\%$ 、 $U_c > 20$  の土質の試験値しかないため、主な近似式の有効な適用範囲は、これらの条件を満たす土質に限られると推測される。

これにより、サクシヨンに寄与する間隙径分布の平均  $\lambda_{v,su}$  は、細粒分含有率と均等係数と平行移動指数の近似式から得られた平行移動指数  $I_{pt,Fc}$ 、 $I_{pt,Uc}$  を用いて以下の式となる。

$$\lambda_{v,su} = D_v(I_{pt,Fc}) \quad (3.3.3)$$

$$\lambda_{v,su} = D_v(I_{pt,Uc}) \quad (3.3.4)$$

ここに、 $D_v(I_{pt,Fc})$ ：元の間隙径分布の  $I_{pt,Fc}$  に対応する管径、 $D_v(I_{pt,Uc})$ ：元の間隙径分布の  $I_{pt,Uc}$  に対応する管径。

### 3.4 平行移動指数と粒度特性値との関係式を用いた保水性推定精度に関する検討

平行移動指数の関係から得られた近似式を用いて、サクションに寄与する間隙径分布を算出した際のモデルの推定精度について検討した。前項で用いた24試料の保水性試験結果と、近似式を用いて算出した水分特性曲線の計算結果を比較した。

図3.4.1に実験値のサクションに対応する体積含水率の実験値と、計算結果の体積含水率を示す。細粒分含有率と均等係数の両者の近似式を用いた計算結果は、およそ実験値の体積含水率  $W_v \pm 0.1$  に収まる結果となった。このことから、粒度特性値と平行移動指数の近似式を用いることで、保水性試験結果を用いることなくサクションに寄与する間隙径分布を算出することができる可能性が示唆された。なお、本検討では、近似式に用いた土質で推定精度を検討しているため、近似式に用いていない試料に対する評価は6章で議論する。

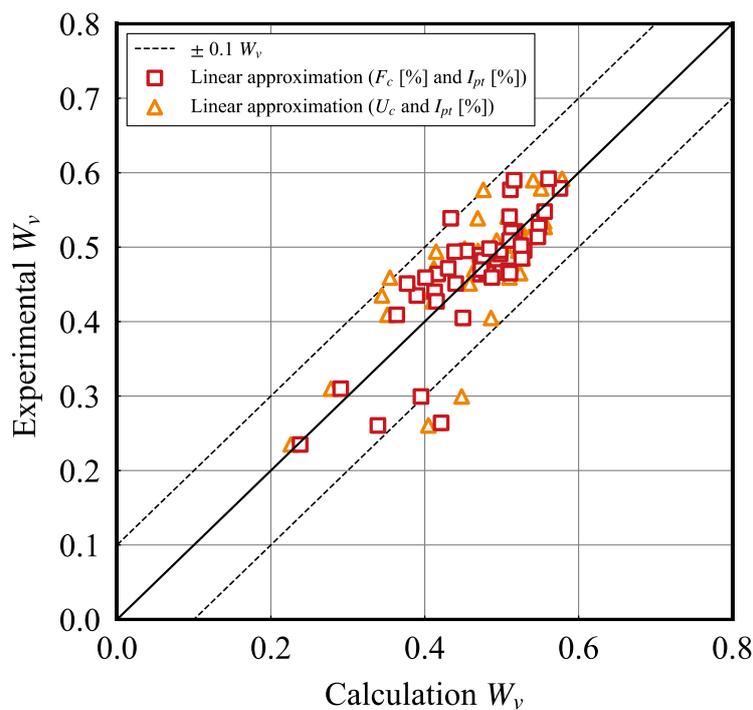


図 3.4.1 近似式を用いた計算結果の体積含水率と試験結果の体積含水率

### 3.5 寄与率の提案

#### 3.5.1 寄与率の提案

平行移動指数は、サクシオンに寄与する間隙径分布の累積間隙体積百分率 50%管径が元の間隙径分布の累積間隙体積百分率の何%に対応するかと定義しているため、その土の平均的なサクシオンに寄与する水の割合を示す指標と考えられる。しかし、供試体の体積含水率（飽和度）やサクシオン、土質の違いによって、サクシオンに寄与する間隙水の割合が異なると考えられる。そこで、間隙モデルで算出される間隙径分布から各サクシオンや体積含水率に着目したサクシオンに寄与する水の割合を寄与率として提案した。また、体積含水率、サクシオン、土質の違いによる寄与率の特徴について検討した。

間隙モデルでは、間隙を円管と仮定しており、水は間隙径の小さい方から入ると仮定している。図 3.5.1 に水分特性曲線と、円管が保持する水の概念図を示している。ここで、水分特性曲線の計算結果は元の間隙径分布（式 (2.2.6) の累積分布関数）から得られたものであり、計算結果は試験値に比べて過小評価されている。実測の体積含水率を  $W_v$  とすると、 $W_v$  における円管が保持する最大管径  $d$  は式を用いて図 3.5.1（右）のようになる。ここで、実測のサクシオン  $s_u$  に対応する間隙モデルで得られた計算結果の体積含水率  $W'_v$  は図 3.5.2 に示すよう表せる。この体積含水率  $W'_v$  における間隙径を実測のサクシオンに相当する管径  $d_{su}$  と定義しており、実際のサクシオンを表現するためには、実測の体積含水率  $W_v$  に対応する管径  $d$  よりも  $d_{su}$  を小さくする必要があることを示している（図 3.5.2（右））。ここで、実測のサクシオン  $s_u$  に対応する間隙モデルで得られた計算結果の体積含水率  $W'_v$  をサクシオンに寄与する体積含水率と定義する。実測のサクシオン  $s_u$  に対する寄与率  $W_{vcont}$  は以下の式で表せる。

$$W_{vcont} = \frac{\text{サクシオンに寄与する体積含水率 } W'_v}{\text{実測の飽和度 } W_v} \times 100\% \quad (3.5.1)$$

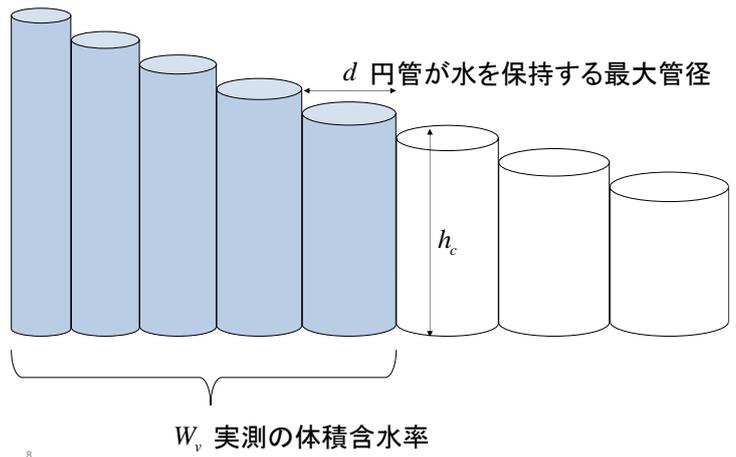
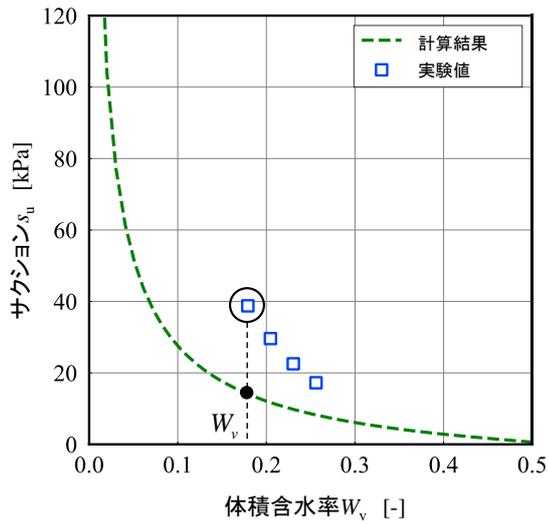


図 3.5.1 水分特性曲線（左）と  $W_v$  に対する円管が保持する水の概念図（右）

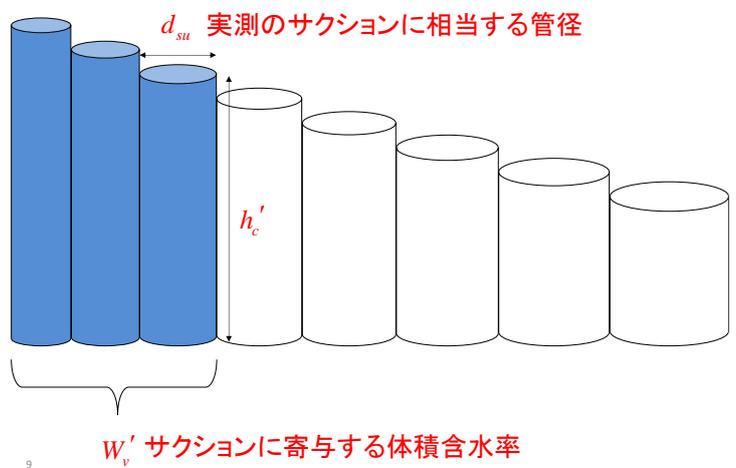
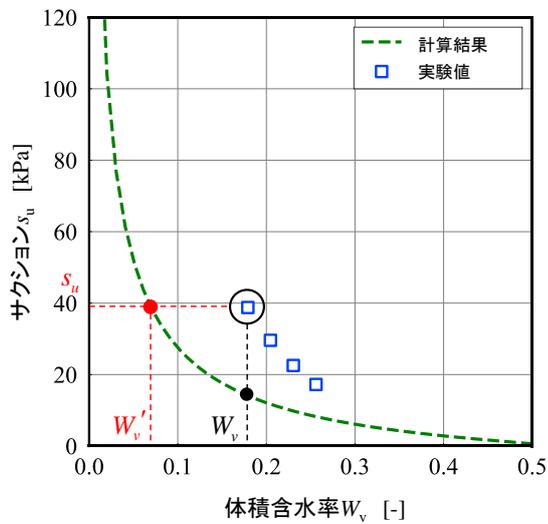


図 3.5.2 水分特性曲線（左）と  $W'_v$  に対する円管が保持する水の概念図（右）

### 3.5.2 寄与率の特徴についての検討

寄与率が明らかとなれば、ある体積含水率に対して寄与率を乗ずることでサクシオンに寄与する体積含水率が求まる。サクシオンに寄与する体積含水率に対応する管径  $d_{su}$  からサクシオンが求まるため、モデルの推定精度が向上する。そこで、前項で用いた火山灰質砂質土 12 試料の加圧板法で得られた試験値を用いて寄与率を算出し、体積含水率やサクシオン、土質による違いについて検討した。

初めに、実測の体積含水率  $W_v$ 、サクシオン  $s_u$  と寄与率  $W_{vcont}(\%)$  について検討する。図 3.5.3 に実測の体積含水率と寄与率の関係を示す。実測の体積含水率が大きいと寄与率も大きくなるように見える。これは実測の体積含水率が大きいとより多くの間隙水がサクシオンに寄与していることに対応している。また、ばらつきの要因としては土質による違いであると考えられる。図 3.5.4 に実測のサクシオンと寄与率の関係を示す。サクシオンが増加するに従って、寄与率が減少する傾向にあることがわかる。これより、サクシオンが低いとより多くの間隙水がサクシオン寄与すると考えられる。また、同じサクシオンでも、土質によって寄与率が異なる傾向にあることが明らかとなった。

次に土質の違いによる寄与率について検討した。各サクシオン (4.91kPa, 9.81kPa, 49.2kPa) に対する寄与率と細粒分含有率の関係について検討する。図 3.5.5 図 3.5.6 図 3.5.7 には、それぞれ 4.91kPa, 9.81kPa, 49.2kPa における寄与率と細粒分含有率の関係を示す。各サクシオンにおいて、細粒分含有率が多い土質ほど、寄与率が高い傾向にある。このことから、細粒分含有率が多く土質ほど、間隙水がサクシオンに寄与することが明らかとなった。また、これらの関係の相関係数はサクシオン 4.91kPa, 9.81kPa, 49.2kPa でそれぞれ、 $r=0.81, 0.85, 0.89$  となり、非常に相関が高いことが明らかとなった。また、図 3.5.8 には線形回帰によって近似した結果を示す。試験結果は  $F_c > 20\%$  のデータしかないため、適用範囲は限られるものと考えられるが、各サクシオンにおけるサクシオンに寄与する間隙水の寄与率を細粒分含有率から決定することができる可能性が示唆された。

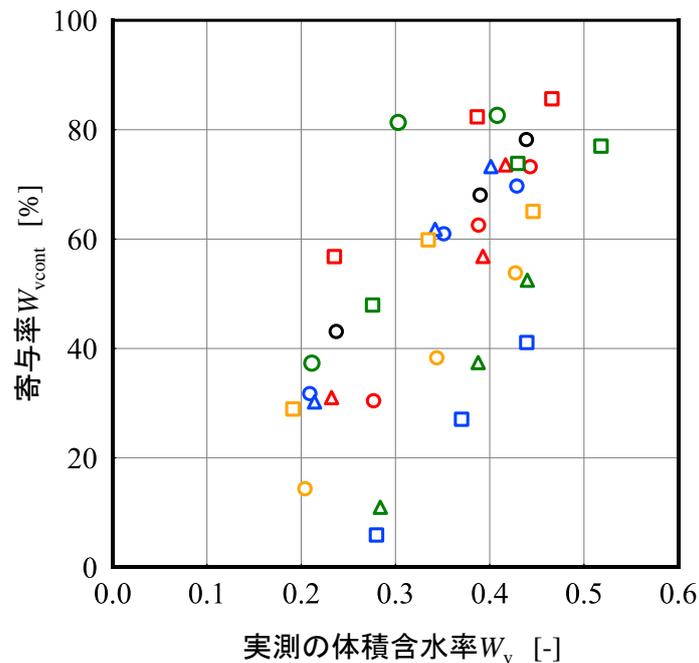


図 3.5.3 実測の体積含水率  $W_v$  とサクシオンに寄与する飽和度  $W_{vcont}(\%)$  の関係

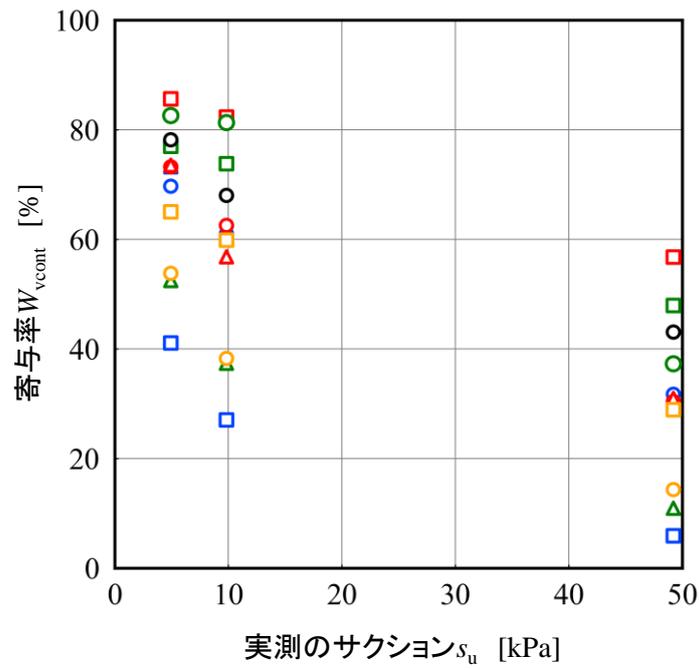


図 3.5.4 実測のサクション  $s_u$  とサクションに寄与する飽和度  $W_{vcont}(\%)$  の関係

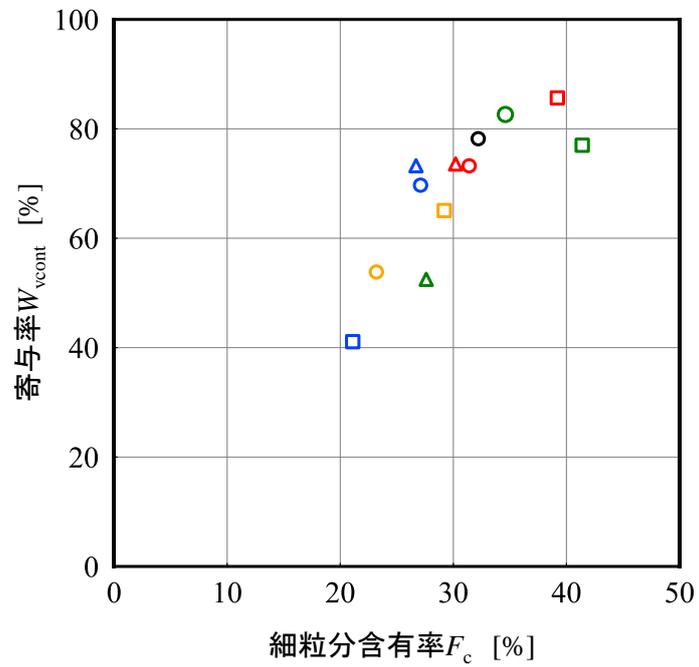


図 3.5.5 4.91kPa における寄与率と細粒分含有率の関係

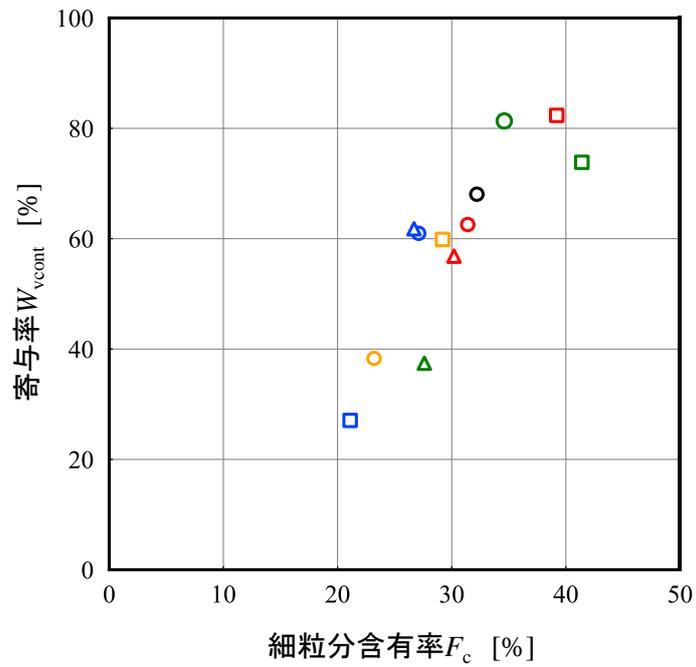


図 3.5.6 9.81kPa における寄与率と細粒分含有率の関係

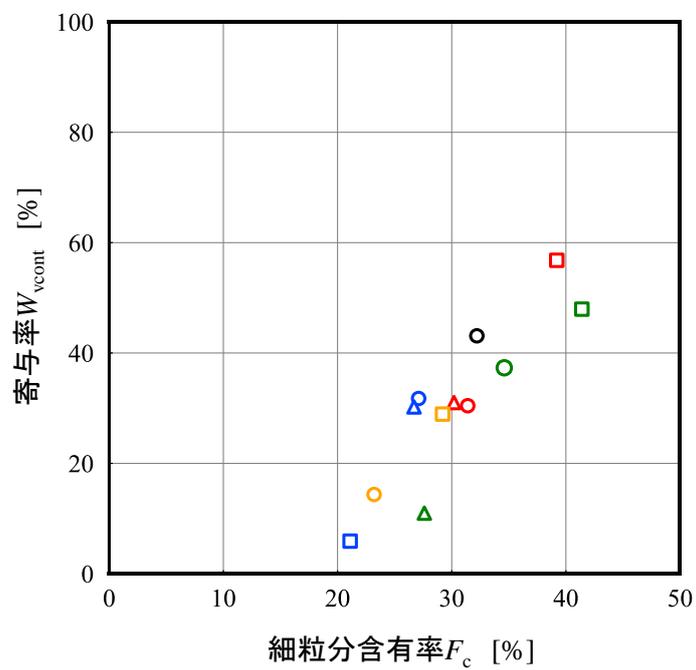


図 3.5.7 49.2kPa における寄与率と細粒分含有率の関係

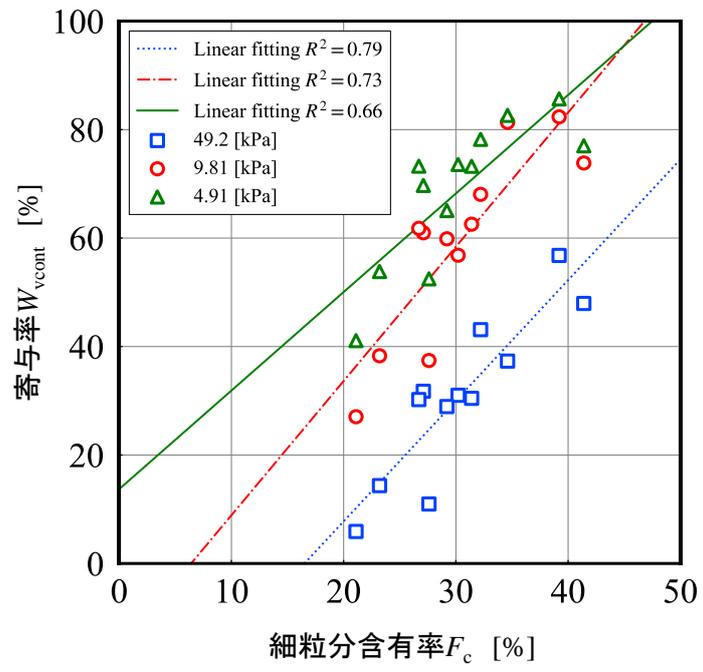


図 3.5.8 各サクションにおける寄与率と細粒分含有率の関係

### 3.6 本章のまとめ

本章では、間隙構造に着目した間隙径分布の導出方法について検討した。まず、Sako and Kitamura<sup>1)</sup>が提案する保水性試験結果から算出される間隙径分布の逆算値と、その逆算値から得られるサクシオンに寄与する間隙径分布の導出方法について整理した。また、元の間隙径分布とサクシオンに寄与する間隙径分布から得られる平行移動指数と、粒度特性値との関係性について再検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出するための導出式を提案し、その精度について明らかとした。また、各サクシオンにおけるサクシオンに寄与する間隙水の割合を寄与率として提案し、各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について考察した。得られた知見を以下に示す。

- 3-1) 火山灰質砂質土 30 試料と砂質土 24 試料に対して平行移動指数を算出し、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）との関係性について検討した結果、ばらつきが大きいことが明らかとなった。その要因としては、試験方法の違いや試験条件の違いが考えられる。
- 3-2) 加圧板法と水頭法で得られたサクシオンの条件が等しい火山灰質砂質土 24 試料に対して検討した結果、細粒分含有率や均等係数が大きい土質は平行移動指数も大きくなる傾向があることが明らかとなった。これは、細かい粒子が多い土質ほど、多くの間隙水が寄与していることを示唆している。また、その関係から線形回帰による導出式を提案した。
- 3-3) 導出式を用いた平行移動指数から水分特性曲線を推定し、保水性推定精度について検討した結果、実験値の体積含水率  $W_v \pm 0.1$  の範囲となることが明らかとなった。
- 3-4) 各サクシオンにおける寄与率を提案した結果、低サクシオン域（高飽和度域）でサクシオンに寄与する間隙水が多いこと、細粒分含有率が多い土質ほど、各サクシオンにおける寄与率も大きくなる傾向にあることが明らかとなった。また、細粒分含有率と寄与率には強い相関があることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 2) Schindler, U.: Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben, *Archiv für Ackerbau, Pflanzenbau und Bodenkunde*, Berlin, Vol. 24, pp. 1-7, 1980.
- 3) 宇野尚雄, 神谷浩二, 田中宏路: 「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, *土木学会論文集*, No.603, III-44, pp. 35-44, 1998.
- 4) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, *土木学会論文集*, No.535, III-34, pp. 83-92, 1996.
- 5) 地盤工学会編: 地盤材料試験の方法と解説, 第一回改訂版, 二分冊の一, pp.465-478, 2020.
- 6) 地盤工学会編: 地盤材料試験の方法と解説, 第一回改訂版, 二分冊の一, 第3編 7章 土の保水性試験, pp.184-198, 2020.

## 第4章 素体積高さ $D_{cha}$ に着目した間隙径分布の導出に関する検討 (Case2)

### 4.1 本章の概要

本章では、モデルの素体積高さ  $D_{cha}$  に着目した間隙径分布の導出方法について述べる。素体積高さ  $D_{cha}$  はその土を代表する粒径粒径（代表粒径，特徴粒径）と定義されており，間隙径分布の導出に關係するパラメータである。代表粒径とは，ある力学挙動を平均的に表すことのできる代表的な粒径であり，従来の土質力学においては有効径  $D_{10}$ （10%通過粒径）や，50%通過粒径，平均粒径などが例として挙げられる。従来の間隙モデルでは， $D_{10}$ （10%通過粒径）が透水係数に影響を及ぼす粒径<sup>1)</sup>であることが知られていることから， $D_{cha}=D_{10}$ と固定してきた<sup>2)</sup>。しかし，土質によって粒径加積曲線は異なるため，間隙径分布に關係する代表粒径が土質ごとに存在すると考える。したがって，本章では前述したサクシオンに寄与する間隙径分布に關係する代表粒径を土質ごとに決定することを目的とする。さらに，その代表粒径を土質の粒度特性値（細粒分含有率，均等係数）から，算出することができれば，モデルの保水性の予測性が向上すると考えられる。そこで，サクシオンに寄与する間隙径分布に關係する素体積高さ  $D_{cha}$  を土質ごとに決定するための導出式を提案し，シラスを含む砂質土と砂質土の保水性試験結果から  $D_{cha}$  を算出した。 $D_{cha}$  と式中のパラメータと粒度特性値との關係について検討し，最終的に粒度特性値から  $D_{cha}$  を求めることにより，サクシオンに寄与する間隙径分布を導出する方法を提案する。加えて，提案手法の適用範囲や保水性推定精度について議論する。

### 4.2 素体積高さ $D_{cha}$ に関する式の提案

図 2.2.1 (a)に示す母集団（三軸供試体）から採取した図 2.2.1 (b)標本集団について考える。図 4.2.1 に間隙比  $e$  の単位体積の立方体の土の相構成を示す。この立方体の間隙比を  $e$  とし，立方体の土粒子部分の質量が  $M_{s,unit}$  と示されるとき，土粒子密度  $\rho_s$  を用いて以下の式で表せられる。（ここで，全ての土粒子の密度が  $\rho_s$  と仮定している。）

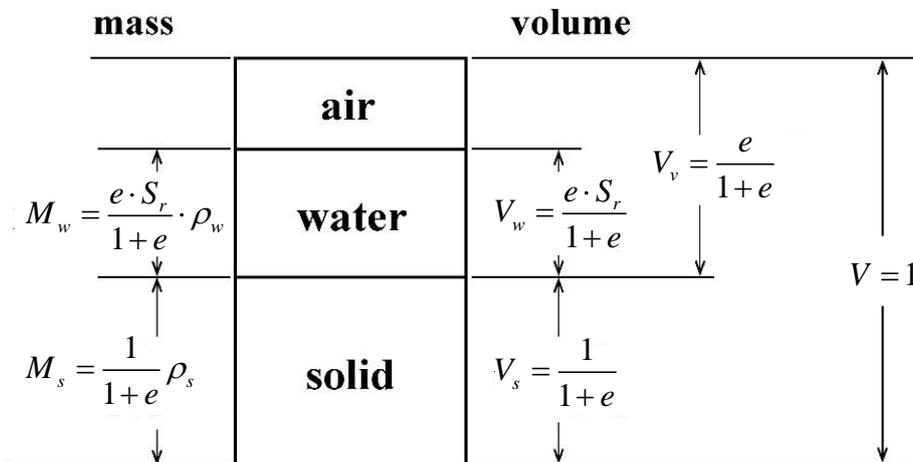


図 4.2.1 土の層構成

$$M_{s,unit} = \frac{1}{1+e} \cdot \rho_s \quad (4.2.1)$$

底面に作用する単位面積当たりの平均的な力は、乾燥密度  $\rho_d$  を用いると以下の式となる。

$$P_{bottom} = \rho_d \cdot g \cdot 1 = \frac{1}{e+1} \rho_s \cdot g \quad (4.2.2)$$

ここに、 $g$  : 重力加速度。

次に土粒子に着目した底面に作用する単位面積当たりの平均的な力  $P_{bottom}$  の導出方法について述べる。一般的に、土の粒径加積曲線の多くは対数正規分布に従うことが知られている。図 4.2.2 に対数正規分布によって近似された粒径加積曲線の一例を示す。図 4.2.3 には、正規化された粒径加積曲線の確率密度関数  $f(D_s)$  の概念図を示す。このとき、正規分布の横軸が  $n=360$  で等分割されており、横軸の  $i$  番目の区間に関連する粒径を  $D_{s,i}$  とし、区間の粒径増分を  $\Delta D_{s,i}$  とする。また、間隙モデルでは確率密度関数の横軸  $u$  は +4 から -4 までを用いている。  $i$  番目の区間の土粒子の質量を  $M_{s,unit,i}$  とすると、図 2.2.1 (b) に示す立方体の質量は次式で表せる。

$$M_{s,unit} = \sum_{i=1}^n M_{s,unit,i} \quad (4.2.3)$$

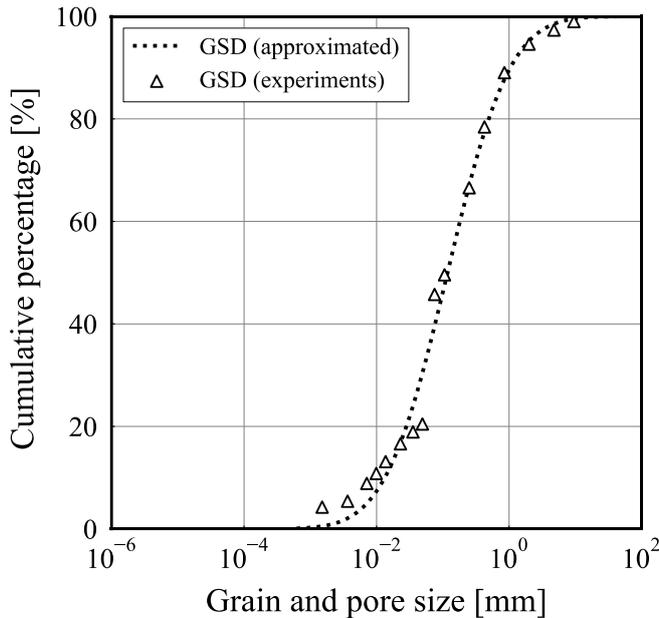


図 4.2.2 対数正規分布で近似された粒径加積曲線

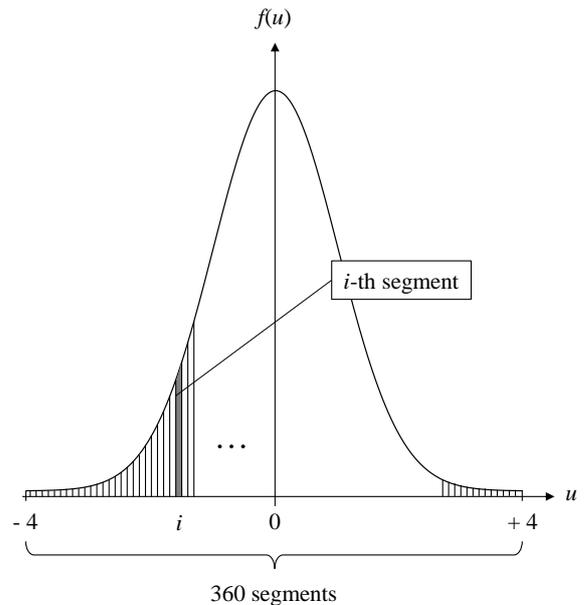


図 4.2.3 正規化された粒径加積曲線の確率密度関数

$i$  番目の区間における粒子数を  $N_{prt,i}$  とすると、 $i$  番目の区間の土粒子の質量は次式の関係で表される。ここで土粒子を球と仮定している。

$$M_{s,unit,i} = N_{prt,i} \cdot \frac{D_{s,i}^3}{6} \cdot \pi \cdot \rho_s \quad (4.2.4)$$

また、 $M_{s,unit,i}$  は粒径加積曲線の確率密度関数  $f(D_s)$  を用いて以下の式でも表せる。

$$M_{s,unit,i} = M_{s,unit} \cdot f(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \quad (4.2.5)$$

式(4.2.1)と式(4.2.4)を式(4.2.5)に代入することで次式が得られる。

$$N_{prt,i} = \frac{1}{e+1} \cdot \frac{6}{D_{s,i}^3 \cdot \pi} \cdot f(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \quad (4.2.6)$$

式(4.2.6)の間隙比、粒径加積曲線は既知であることから、各粒径の粒子数が計算できる。最終的に、単位体積当たりの粒子数  $N_{prt}$  は、次式で計算することができる。

$$N_{prt} = \sum_{i=1}^n N_{prt,i} = \frac{6}{\pi(e+1)} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \quad (4.2.7)$$

よって、単位体積当たりの粒子数は、間隙比と粒径加積曲線から計算することができる。

図 4.2.4 には、式(4.2.7)を用いて算出される  $D_{s,i}$  と  $N_{prt,i}$  の関係の模式図を示している。図に示すように、粒子の数は  $M_{s,unit,i}$  と  $D_{s,i}$  に依存するため、直径が小さい粒子ほど数が増えると予想される。

ここで、単位体積中の粒子が均一な球であり、その直径が代表粒径（特徴径） $D_{cha}$  である場合、 $P_{bottom}$  は以下の式で表せる。

$$P_{bottom} = \rho_s \cdot g \cdot \frac{D_{cha}^3 \cdot \pi}{6} \cdot N_{prt} \quad (4.2.8)$$

式(4.2.2)と式(4.2.6)を式(4.2.8)に代入すると、 $D_{cha}$  は以下の式で表せる。

$$D_{cha} = \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \right\}^{-\frac{1}{3}} \quad (4.2.9)$$

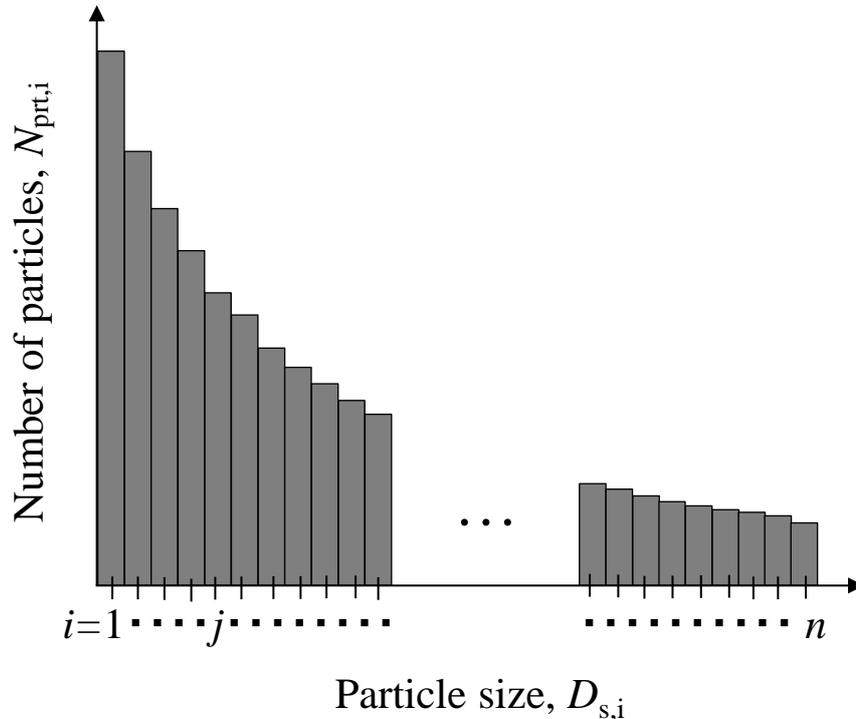


図 4.2.4  $D_{s,i}$  と  $N_{prt,i}$  の関係

式 (4.2.9) を用いて  $D_{cha}$  を算出した間隙径分布と、従来の間隙モデル  $D_{cha} = D_{10}$  とした際の計算結果の比較を行う。試料には、3 章で用いた串良川流域で採取された、河川堤防の築堤材料として活用される串良川堤体土（串良土）を用いており、入力パラメータは表 3.2.1 に示している。また、計算結果と試験結果の比較には、簡易蒸発法（HYPROP）によって得られた水分特性曲線の 4 点を用いている。

図 4.2.5 に粒径加積曲線と間隙径分布を示す。三角で示すプロットは、粒度試験から得られた試験結果であり、破線で示す粒径加積曲線は式 (2.2.3)、式 (2.2.4)、式 (2.2.5) から得られた対数正規分布で近似された粒径加積曲線を示す。間隙径分布は、式 (2.2.6)、式 (2.2.7)、式 (2.2.8) を基に決定され、間隙径分布の変動係数は粒径加積曲線の変動係数と同じと仮定することで導出される。四角のプロットは、保水性試験結果から逆算された間隙径を示す。 $D_{cha} = D_{10}$  とした際に算出される間隙径分布は逆算された間隙径よりも過大に評価されていることがわかる。その一方で、 $D_{cha}$  の式から得られた間隙径分布は、逆算された間隙径よりも過小評価されている。図 4.2.6 に水分特性曲線の実験値と計算結果を示す。 $D_{cha} = D_{10}$  とした際に算出される間隙径分布から得られた水分特性曲線は保水性試験結果より過小評価されていることがわかる。その一方で、 $D_{cha}$  の式から得られた間隙径分布から得られた水分特性曲線は試験結果に対して過大に評価していることが明らかとなった。式 (4.2.9) から算出された、素体積高さ  $D_{cha}$  は  $D_{1.58}$ （1.58% 通過粒径）となり、非常に小さくなったことから、間隙径分布が過小に評価され、水分特性曲線は過大に評価されたと考えられる。 $D_{cha}$  の値が小さくなった要因は、式 (4.2.9) が細粒分の個数に影響を受けてしまうことが挙げられる。式 (4.2.9) は式 (4.2.7) に示すように粒径加積曲線から、単位体積当たりの粒子数  $N_{prt}$  を計算することで  $D_{cha}$  を導出している。細かい粒子は、図 4.2.4 に示すように粒子数が多い傾向にあることから、細粒分の個数を過大に評価している。細粒分の個数を過大に評価することによって、単位体積中の粒子が均一な球であり、その直径を代表粒径（特徴径） $D_{cha}$  とする仮定において、一粒子あたりの、粒子径が小さくなるものと考えられる。

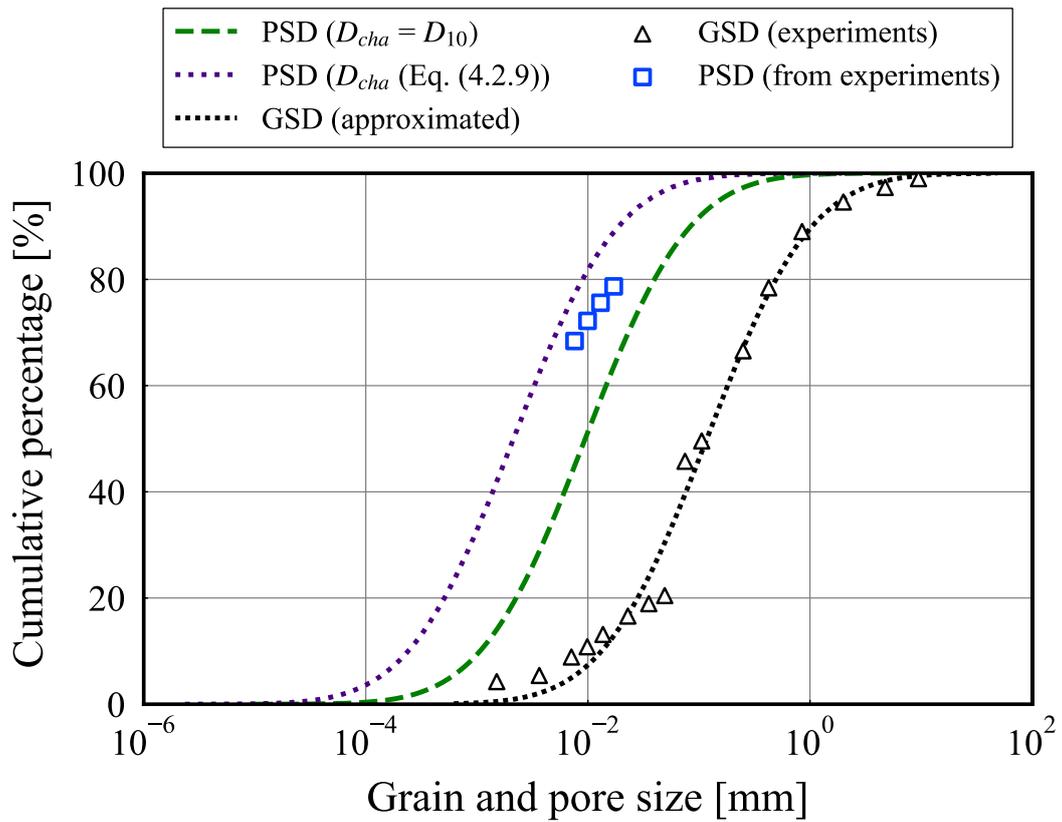


図 4.2.5 粒径加積曲線および間隙径分布

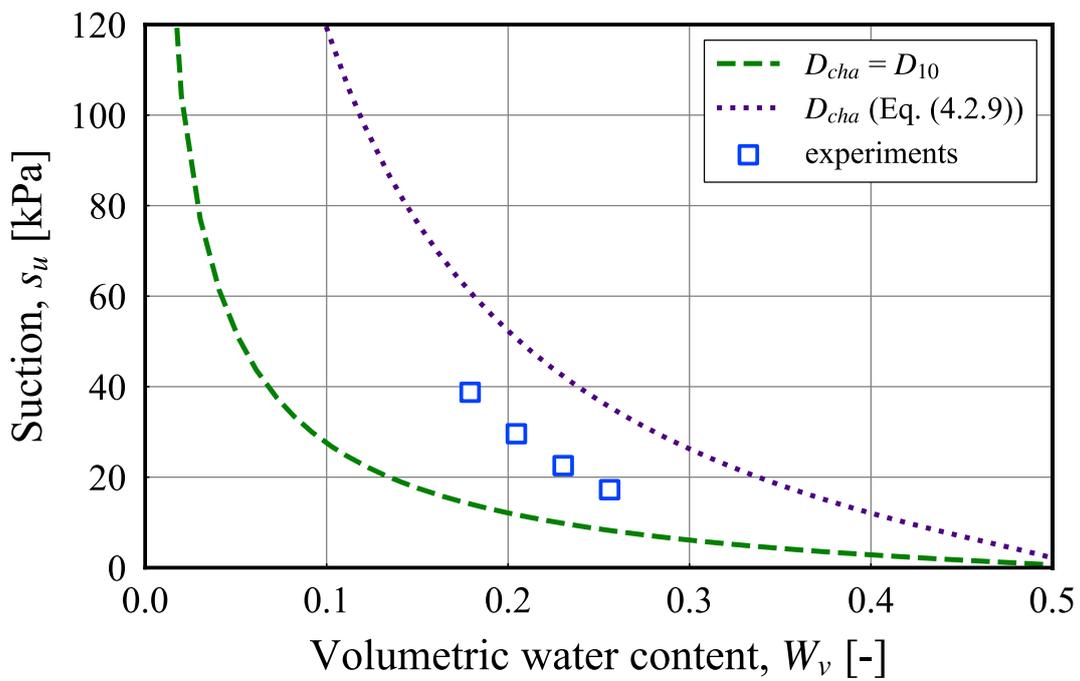


図 4.2.6 水分特性曲線 (串良土)

### 4.3 Kitamura and Sako (2020)による式の改良

Kitamura and Sako<sup>3)</sup>は式、式に対して、 $D_{cha}$  の計算を行う際に細粒分の影響を減らすような式の改良を提案している。図 4.3.1 に示すように、 $D_{cha}$  の算出には、 $D_{s,j}$  より大きい粒径の粒子数を用いることで、過大に評価された細粒分の個数の影響を減らす。さらに、 $j$  番目の区間における粒子径  $D_{s,j}$  は粒子数  $N_{prt}$  (式 (4.2.7)) および式 (4.2.9) の  $D_{cha}$  の計算から取り除かれる粒子の最大粒径、即ち  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径を  $D_\alpha$  と定義している。また、このとき  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_\alpha$  を  $D_{10}$  とした<sup>3)</sup>。これにより、式 (4.2.7)、式 (4.2.8)、式 (4.2.9) は以下の式に書き換えられる。

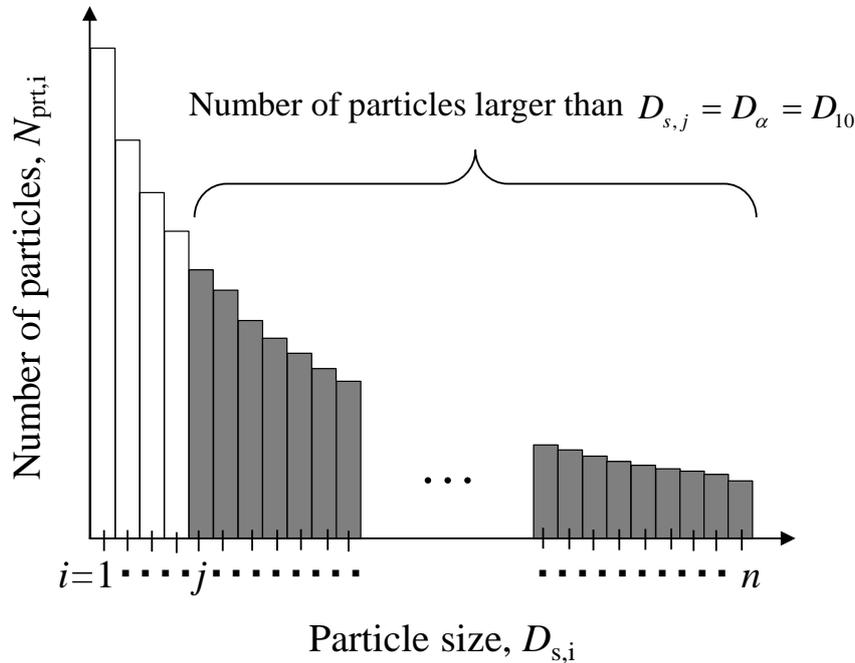


図 4.3.1  $D_{s,i}$  と  $N_{prt,i}$  の関係 ( $D_{s,j} = D_\alpha = D_{10}$ )

$$N_{prt > D_\alpha = D_{10}} = \sum_{i=j}^n N_{prt,i} = \frac{6}{\pi(1+e)} \sum_{i=j}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f_s(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \quad (4.3.1)$$

$$P_{bottom} = \rho_s \cdot g \cdot \frac{D_{cha}^3 \cdot \pi}{6} \cdot N_{prt > D_\alpha = D_{10}} \quad (4.3.2)$$

$$D_{cha} = \left\{ \sum_{i=j}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f_s(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (D_{s,j} = D_\alpha = D_{10}) \quad (4.3.3)$$

提案された改良式に対しての評価が行われていないため、本節では改良効果について述べる。

改良式の評価には、4.2 項で用いた串良川土を用いる。図 4.3.2 に粒径加積曲線と間隙径分布を示す。三角で示すプロットは、粒度試験から得られた試験結果であり、破線で示す粒径加積曲線は式 (2.2.3)、式 (2.2.4)、式 (2.2.5) から得られた対数正規分布で近似された粒径加積曲線を示す。間隙径分布は、式 (2.2.6)、式 (2.2.7)、式 (2.2.8) を基に決定され、間隙径分布の変動係数は粒径加積曲線の変動係数と同じと仮定することで導出される。四角のプロットは、保水性試験結果から逆算された間隙径を示す。式 (4.3.3) から得られた間隙径分布は、式 (4.2.9) に示す  $D_{cha}$  から算出された間隙径分布や、逆算された間隙

径よりも過大に評価されている。図4.3.3に水分特性曲線の実験値と計算結果を示す。改良された  $D_{cha}$  の式 (4.3.3)から得られた間隙径分布より得られた水分特性曲線は試験結果に対して過小に評価されていることが明らかとなった。式 (4.4.3)から算出された、素体積高さ  $D_{cha}$  は  $D_{25.4}$  (25.4%通過粒径) となり、非常に大きくなったことから、間隙径分布が過大に評価され、水分特性曲線は過小評価されたと考えられる。したがって、串良川土のサクシオンに寄与する間隙径分布に関する  $D_{cha}$  は、 $D_{1.58} < D_{cha} < D_{10}$  範囲に存在すると考えられ、 $D_{cha}$  を決定するためには、式 (4.3.3)に示す  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_{\alpha}$  を土質ごとに決定する必要があると考えられる。

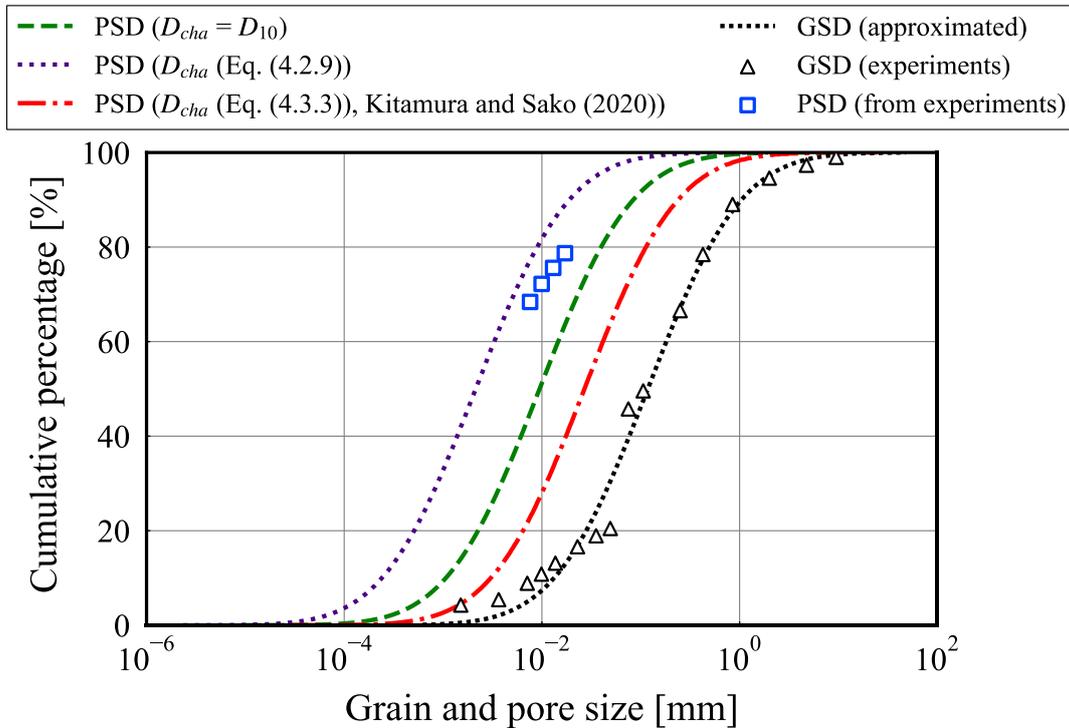


図 4.3.2 間隙径分布 ( $D_{s,j} = D_{\alpha} = D_{10}$ )

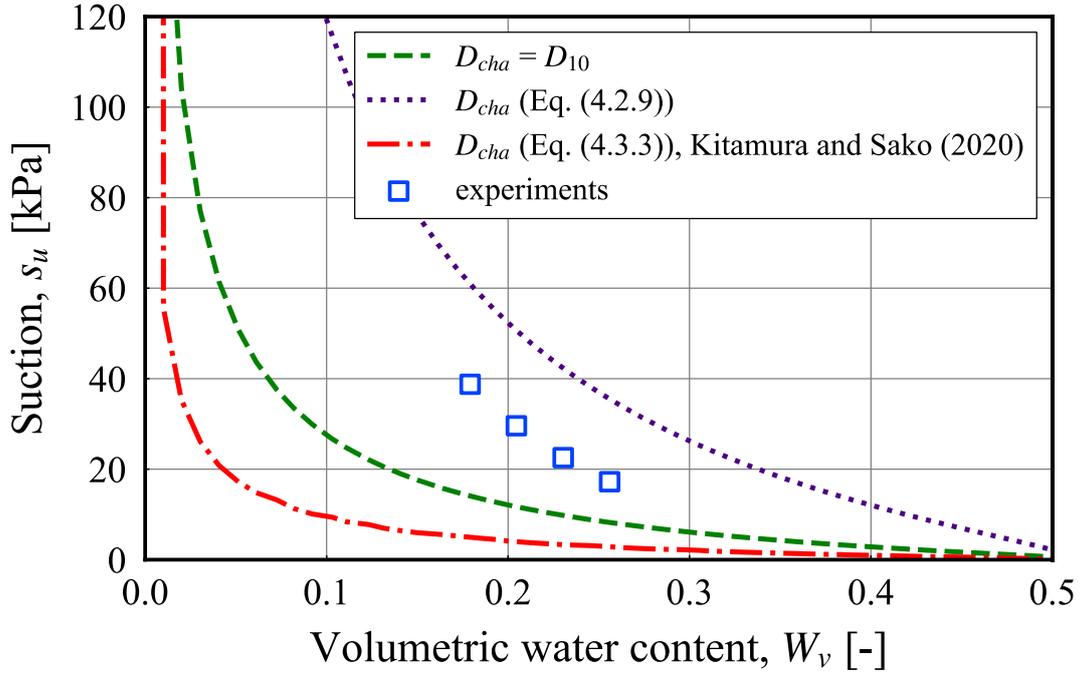


図 4.3.3 水分特性曲線

#### 4.4 最適な最小粒径 $D_\alpha$ に関する検討

$D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_\alpha$  を決定するために式 (4.2.7), 式 (4.2.8), 式 (4.2.9) は以下のように書き換えられる.

$$N_{prt>D_\alpha} = \sum_{i=j}^n N_{prt,i} = \frac{6}{\pi(1+e)} \sum_{i=j}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f_s(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \quad (4.4.1)$$

$$P_{bottom} = \rho_s \cdot g \cdot \frac{D_{cha}^3 \cdot \pi}{6} \cdot N_{prt>D_\alpha} \quad (4.4.2)$$

$$D_{cha} = \left\{ \sum_{i=j}^n \frac{1}{D_{s,i}^3} \cdot f_s(D_{s,i}) \cdot \Delta D_{s,i} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (D_{s,j} = D_\alpha) \quad (4.4.3)$$

最小粒径  $D_\alpha$  を決定し, 式 (4.4.3) を用いて  $D_{cha}$  を土質ごとに決定する手法について述べる. 図 4.4.1 には, 間隙径分布と保水性試験結果と平行移動指数を用いて算出されたサクシオンに寄与する間隙径分布を示す. 先述のように, 式を用いて  $D_{cha}$  を決定する方法 (=  $D_{1.58}$ ) や式 (4.3.3) を用いて  $D_{cha}$  を決定する方法 (=  $D_{25.4}$ ) で得られた間隙径分布は, 保水性試験結果から得られたサクシオンに寄与する間隙径分布に一致しない. そこで, 式 (4.4.3) と図 4.4.2 に示す  $D_{s,j}$  (=  $D_\alpha$ ) を増加させていくことで, サクシオンに寄与する間隙径分布にフィッティングする. このとき, サクシオンに寄与する間隙径分布と一致した際の  $D_\alpha$  と,  $D_\alpha$  を式 (4.4.3) に代入したときの  $D_{cha}$  をサクシオンに寄与する間隙径分布を導出するための  $D_{cha}$  と定義した. 図 4.4.1 に示すように, 申良川土においては, サクシオンに寄与する間隙径分布に一致させるために,  $D_\alpha = D_{0.13}$  (0.13% 通過粒径) とする必要がある, 粒径  $D_\alpha$  は  $6.9 \times 10^{-4}$  mm となる. 即ち,  $D_\alpha = D_{0.13}$  ( $6.9 \times 10^{-4}$  mm) より大きい粒径が,  $D_{cha}$  の計算に用いられており,  $D_\alpha = D_{0.13}$  ( $6.9 \times 10^{-4}$  mm) より小さい粒径は  $D_{cha}$  の計算から取り除かれている.  $D_\alpha$  を式 (4.4.3) に代入したときの  $D_{cha}$  は  $D_{3.81}$  (3.81% 通過粒径) となり, 図 4.4.3 に示すように水分特性曲線の計算結果は保水性試験結果に近い傾向を示している.

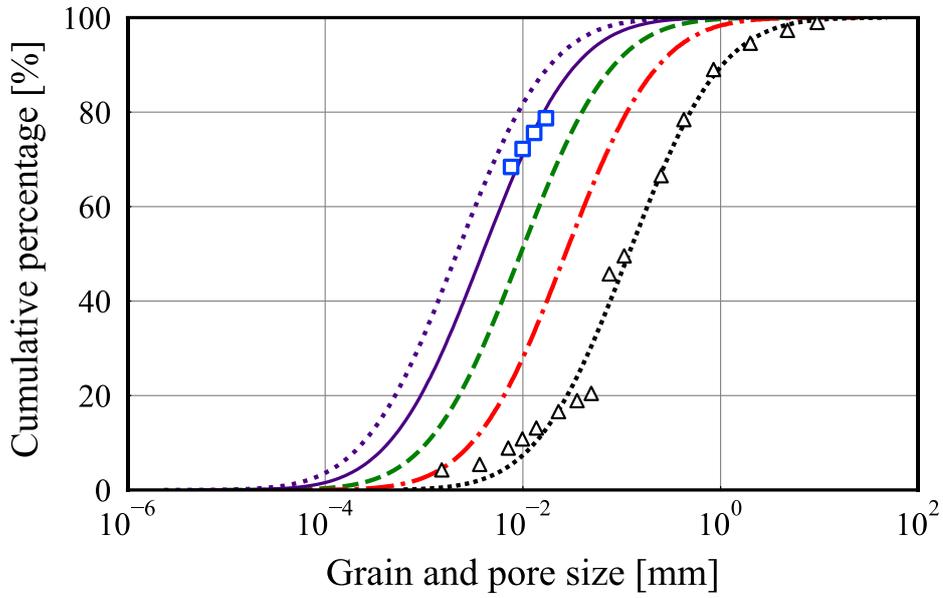
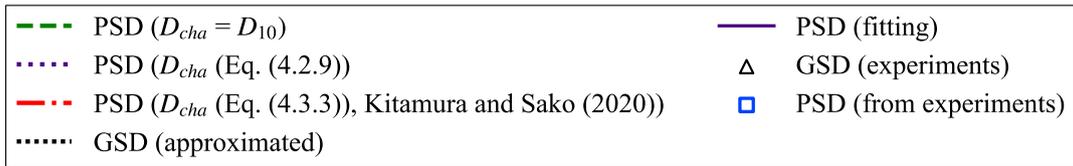


図 4.4.1 間隙径分布 ( $D_\alpha = D_{0.13}$ )

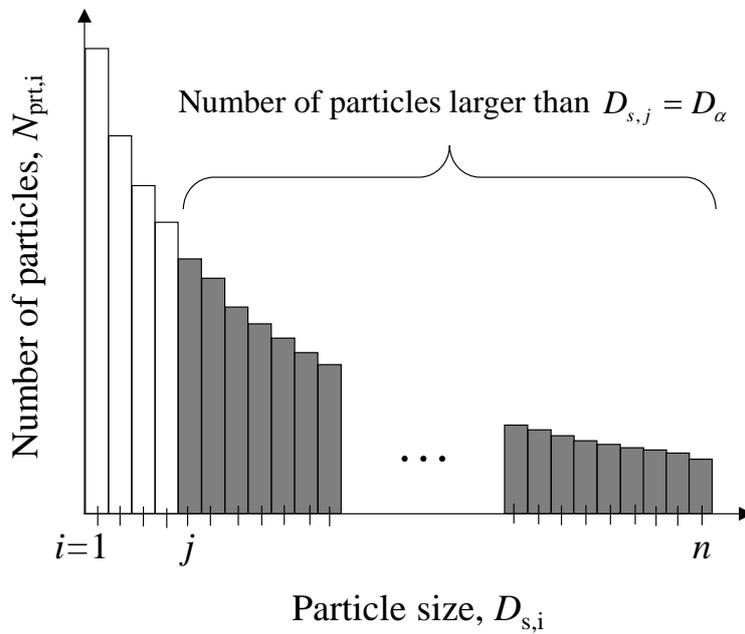


図 4.4.2  $D_{s,i}$  と  $N_{prt,i}$  の関係

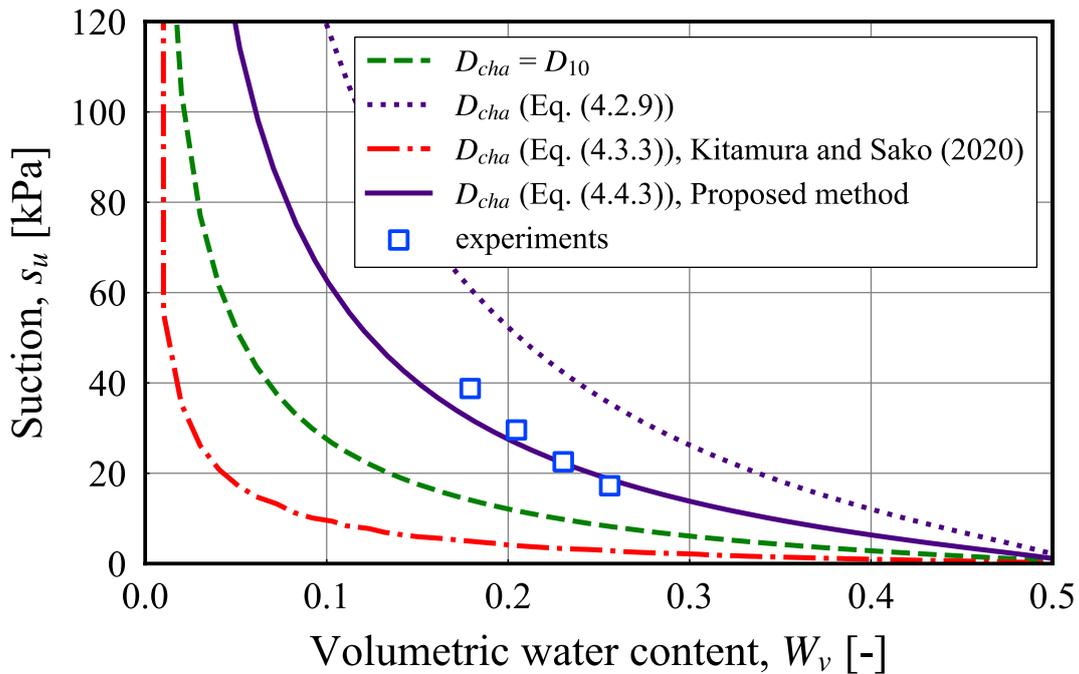


図 4.4.3 水分特性曲線

#### 4.5 $D_{cha}$ , $D_a$ と粒度特性値との関係

$D_{cha}$ ,  $D_a$ ,  $\alpha$  は粒度の影響を受けるため、土質によって異なることが予想される。そこで、3章で用いた42試料（火山灰質砂質土30試料と砂質土12試料）の保水性試験結果を用いて  $D_{cha}$ ,  $D_a$ ,  $\alpha$  傾向について検討した。

図 4.5.1 に  $\alpha$  (%) のヒストグラムを示す。Kitamura and Sako<sup>3)</sup> の提案手法では、 $\alpha = 10$  と仮定されていたが、 $\alpha$  は 0.007~5(%) の範囲であることが明らかとなり、この範囲の値を使用することで、サクシオンに寄与する間隙径分布を推定することができる可能性が示唆された。

次に、粒度特性値と  $D_{cha}$ ,  $D_a$ ,  $\alpha$  (%) の関係について検討する。本検討では、細粒分含有率 ( $F_c$ ) と均等係数 ( $U_c$ ) と  $D_{cha}$ ,  $D_a$ ,  $\alpha$  の関係について検討する。細粒分含有率は細粒分 ( $F_c$ ) (0.075 mm 未満) が占める割合であり、粒径加積曲線から得られる。均等係数 ( $U_c$ ) は  $D_{60}$  (60% 粒径) と  $D_{10}$  (10% 粒径) の比で定義されている。本研究では、対数正規分布で近似された粒径加積曲線より、 $D_{60}$  (60% 粒径) と  $D_{10}$  (10% 粒径) をもとめることで、均等係数を算出している。

図 4.5.2 には粒度特性値と  $\alpha$  (%) の関係を示す。粒度特性値が大きい土質は  $\alpha$  (%) が大きくなる傾向にあるものの、ばらつきが大きい。

図 4.5.3 には粒度特性値と  $D_a$  (mm) の関係を示す。粒度特性値が大きい土質は、 $D_a$  (mm) が小さい傾向が見られるが、 $D_a$  (mm) が取りうる範囲に着目すると、およそ  $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$  であることがわかる。 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$  の範囲の土質に着目すると、それらの土質は、およそ  $F_c > 10\%$  かつ  $25 < U_c < 100$  の土質であることがわかる。また、この最小粒径  $D_a$  の取りうる範囲については、Fredlund<sup>4)</sup> が提案する、粒径加積曲線の近似式中の最小許容粒子径 ( $d_m$ ) の範囲に非常に近いことが明らかとなった。最小許容粒子径は、Fredlund の粒径加積曲線の近似式における粒径の下限値を意味する。Fredlund<sup>4)</sup> からは、最小許容粒子径を  $10^{-3}$  mm とし、Hwang<sup>5)</sup> は最小許容粒子径を  $10^{-4}$  mm とすることで、粒径加積曲線の実験値を良好に近似できることが報告されている。本検討では  $F_c < 10\%$  かつ  $U_c < 25$ ,  $100 < U_c$  の範囲の土

質のデータが少なかったため、粒度特性値が大きい土質で、 $D_{\alpha}$  (mm) が小さくなる要因については考察することができなかった。そのため今後は、そのような土質のデータの蓄積が求められる。

図 4.5.4 に、粒度特性値と  $D_{cha}$  の関係を示す。 $D_{cha}$  は最小粒径  $D_{\alpha}$  を式に代入することで算出される値であり、通過粒径 (%) で表している。 $D_{cha}$  は、0.48%から 13.1%の範囲であり、細粒分含有率や均等係数が増加するほど、 $D_{cha}$  が大きくなる傾向がある。特にシラスを含む火山灰質砂質土 (SV, SV-G, SVG) においては、 $F_c < 40$  の範囲の水頭法で得られた試験結果に対しては、相関係数 0.87 となり強い相関があることが明らかとなった。

以上の結果から、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対しては、 $10^{-4} < D_{\alpha}$  (mm)  $< 10^{-3}$  の範囲となることが明らかとなったことから、 $D_{\alpha}$  を用いて  $D_{cha}$  を土質ごとに決定できる可能性が示唆された。

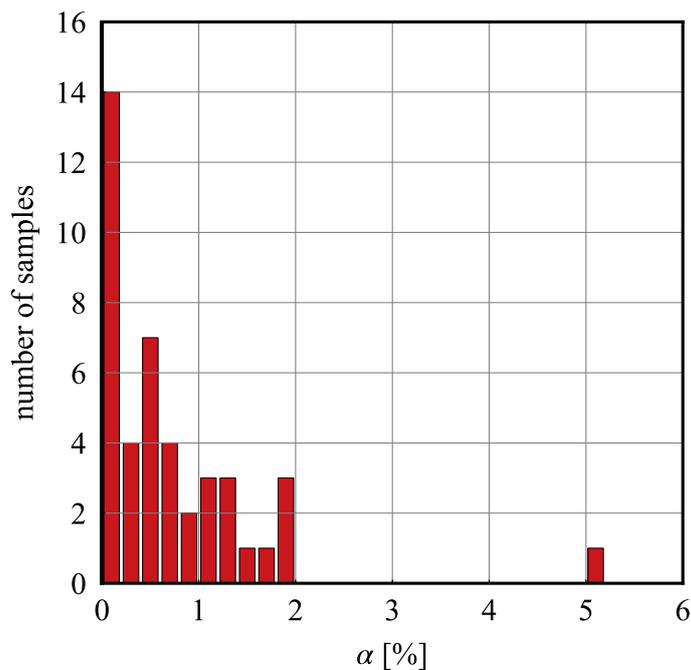
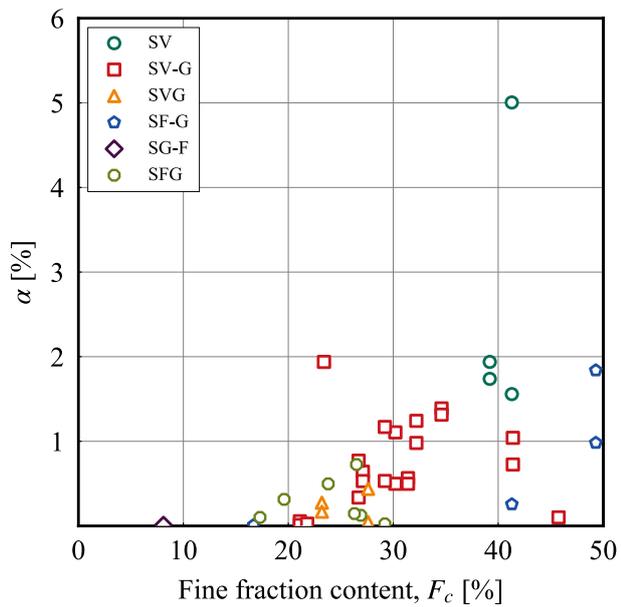
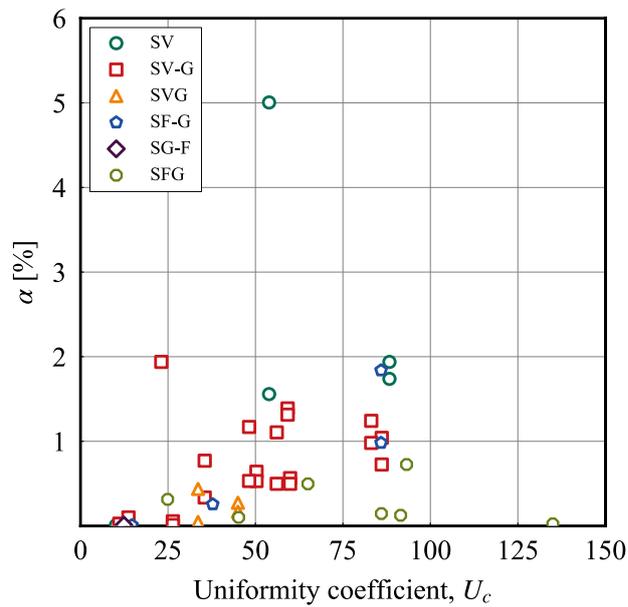


図 4.5.1  $\alpha$  のヒストグラム

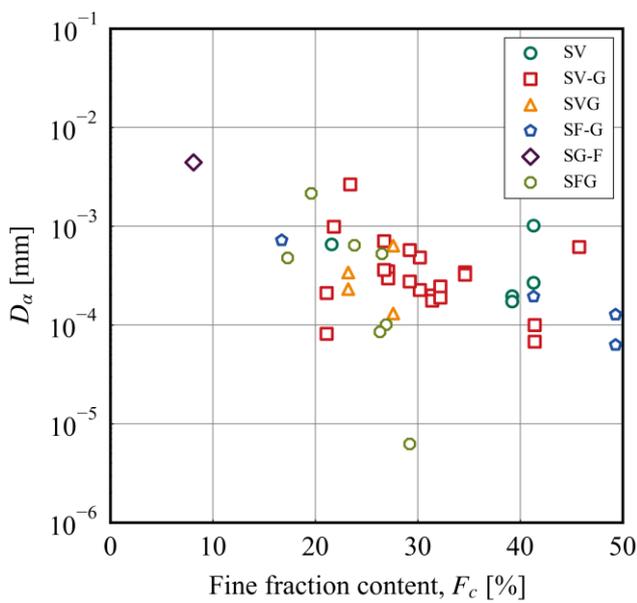


(a)

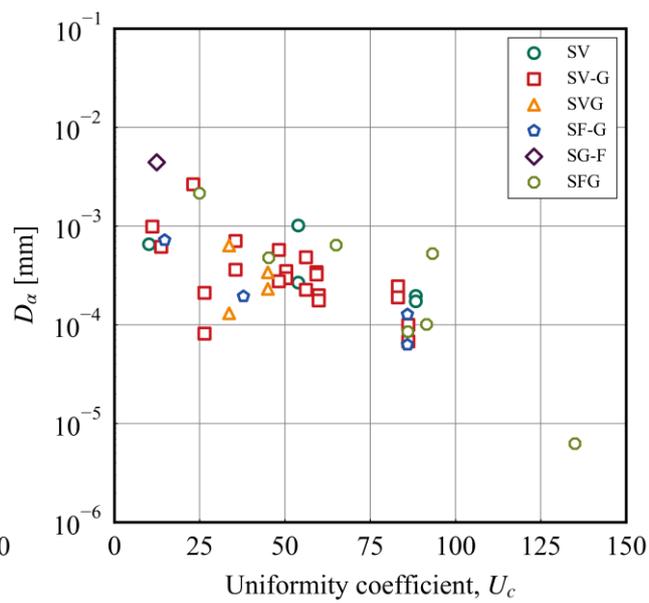


(b)

図 4.5.2 粒度特性値と  $\alpha$  の関係



(a)



(b)

図 4.5.3 粒度特性値と  $D_\alpha$  の関係

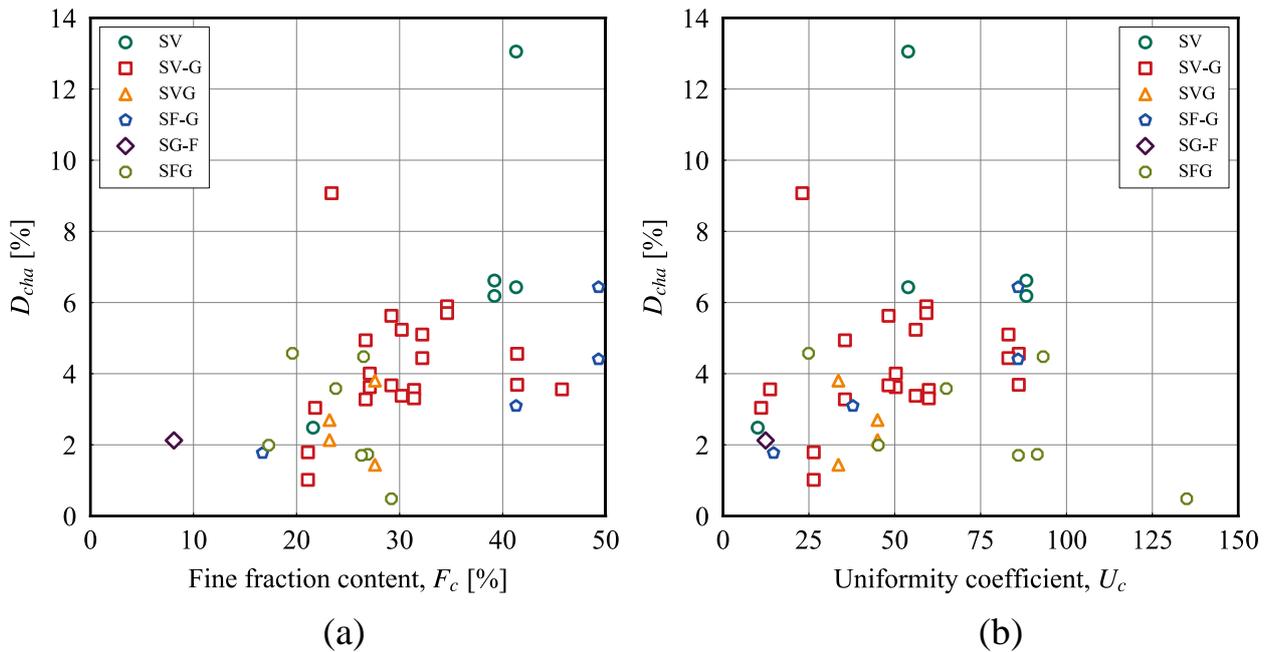


図 4.5.4 粒度特性値と  $D_{cha}$  の関係

#### 4.6 最小粒径 $D_\alpha$ を用いた $D_{cha}$ の推定および水分特性曲線の推定精度

本節では、最小粒径  $D_\alpha$  を用いて算出した  $D_{cha}$  の値と、算出された  $D_{cha}$  を用いた場合の水分特性曲線の推定精度について述べる。前節より、表に示す火山灰質砂質土試料 30 と、砂質土 12 試料の中から、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の範囲の 34 試料を用いて検討する。前節では、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の範囲の土質の最小粒径  $D_\alpha$  の範囲が  $10^{-4} < D_\alpha$  (mm)  $< 10^{-3}$  となることが示された。そこで、式 (4.4.1)、式 (4.4.2)、式 (4.4.3) に  $D_\alpha = 10^{-3}$  mm,  $10^{-4}$  mm をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  の値について検討した。図 4.6.1 に、 $D_\alpha = 10^{-3}$  mm,  $10^{-4}$  mm をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  と最適な  $D_{cha}$  の関係を示す。 $D_\alpha = 10^{-3}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  の値は、最適な  $D_{cha}$  に比べて過大に評価されている。その一方で、 $D_\alpha = 10^{-4}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  の値は、最適な  $D_{cha}$  に近い傾向を示している。

次に  $D_\alpha = 10^{-3}$  mm,  $10^{-4}$  mm をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  を用いて間隙径分布を導出し、水分特性曲線を推定した際の推定精度について検討する。図 4.6.2 に、実験値の体積含水率と、サクシヨンの実験値に対する各計算結果の体積含水率を示す。 $D_\alpha = 10^{-3}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線は、実験値に対して過小評価されている。これは図 4.6.1 に示すように、最適な  $D_{cha}$  に対して過大に評価されていることによる。即ち、 $D_\alpha = 10^{-3}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  から得られた間隙径分布は、サクシヨンに寄与する間隙径分布よりも過大に評価していることを示している。 $D_\alpha = 10^{-4}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線は、実験値に対して近い傾向を示している。保水性推定精度に着目すると、 $D_\alpha = 10^{-4}$  mm と設定したときのあるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおおよそ  $W_v \pm 0.1$  となる。

加えて、最小粒径  $D_\alpha$  の範囲が  $10^{-4} < D_\alpha$  (mm)  $< 10^{-3}$  の範囲内で  $D_\alpha$  を設定したときに、保水性推定精度がどの程度になるか検討した。本検討では、簡易的に 34 試料の最小粒径  $D_\alpha$  の幾何平均値 ( $D_\alpha = 2.6 \times 10^{-4}$  mm) を算出した。図 4.6.2 に示すように  $D_\alpha$  の幾何平均 ( $D_\alpha = 2.6 \times 10^{-4}$  mm) に設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線は、 $D_\alpha = 10^{-4}$  mm と設定したときよりも実験値の体積含水率に近いことが明らか

となり、あるサクションに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.05$  となることが示された。

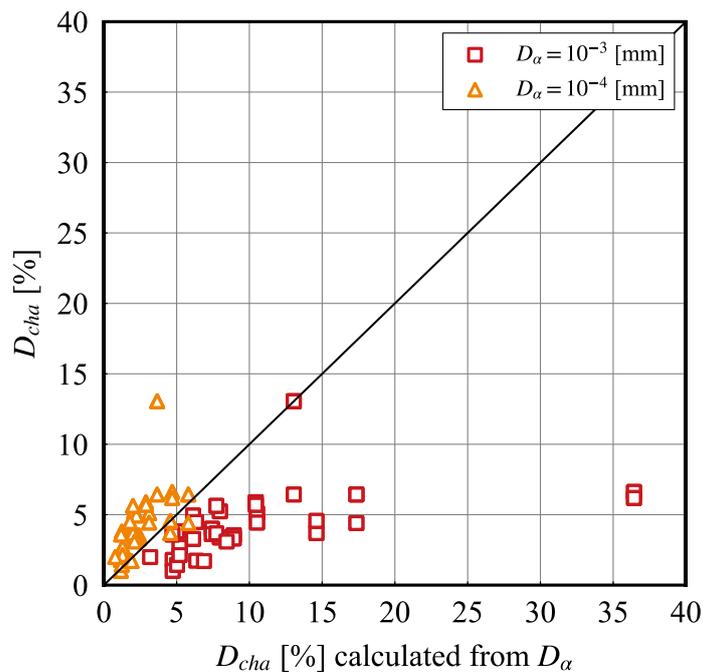


図 4.6.1  $D_\alpha$  ( $= 10^{-4}, 10^{-3}$ mm) から算出された  $D_{cha}$  と最適な  $D_{cha}$  の関係

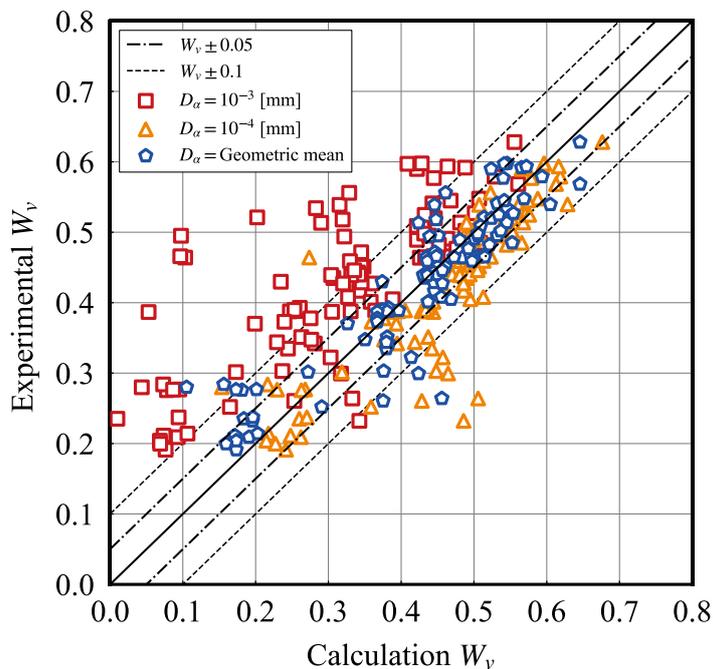


図 4.6.2 実験値の体積含水率と  $D_\alpha$  から求まる  $D_{cha}$  による計算結果の体積含水率

#### 4.7 本章のまとめ

本章では、モデルの素体積高さ  $D_{cha}$  に着目した間隙径分布の導出方法について述べた。素体積高さ  $D_{cha}$  はその土を代表する粒径粒径（代表粒径、特徴粒径）と定義されており、間隙径分布の導出に関するパラメータである。従来の間隙モデルでは、 $D_{10}$ （10%通過粒径）が透水係数に影響を及ぼす粒径であることが知られていることから、 $D_{cha}=D_{10}$  と固定してきた。しかし、間隙径分布に関する代表粒径が土質ごとに存在すると考えられたため、サクシオンに寄与する間隙径分布に関する代表粒径を土質ごとに決定することを目的とした。サクシオンに寄与する間隙径分布に関する素体積高さ  $D_{cha}$  を土質ごとに決定するための導出式を提案し、シラスを含む砂質土と砂質土の保水性試験結果から  $D_{cha}$  を算出した。 $D_{cha}$  と式中のパラメータと粒度特性値との関係について検討し、最終的に粒度特性値から  $D_{cha}$  を求めることにより、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出する方法を提案した。加えて、提案手法の適用範囲や保水性推定精度について議論した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 4-1) 粒径加積曲線の確率密度関数を用いた素体積高さ  $D_{cha}$  の導出式を提案した結果、細粒分の個数の影響を過大に評価する傾向にあり、 $D_{cha}$  のサイズが過小評価される。それによって、間隙径分布は過小評価されるため、水分特性曲線の計算結果は試験結果に対して過大に評価される傾向がある。
- 4-2) Kitamura and Sako<sup>3)</sup>による改良式の評価を行った結果、式中の  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_{\alpha}$  ( $\alpha=10$ ,  $D_{10}$  未満の粒径の影響を取り除く)、とする計算結果は、 $D_{cha}$  のサイズを過大に評価するため、水分特性曲線は試験結果に対して過小評価される傾向にあることが明らかとなった。
- 4-3) 最小粒径  $D_{\alpha}$  を調節しながら  $D_{cha}$  のサイズを保水性試験結果から逆算された間隙径分布（サクシオンに寄与する間隙径分布）に一致させるようにすることで、最適な  $D_{cha}$  を決定する方法を提案した。また、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）と最小粒径  $D_{\alpha}$ ,  $D_{cha}$  との関係性について検討した結果、特に  $F_c > 10\%$  かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対して、 $10^{-4} < D_{\alpha}$  (mm)  $< 10^{-3}$  となる傾向にあることが明らかとなった。
- 4-4)  $F_c > 10\%$  かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対して  $D_{\alpha} = 10^{-3}$  mm,  $10^{-4}$  mm をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  を用いて間隙径分布を導出し、水分特性曲線を推定した際の推定精度について検討した。その結果、 $D_{\alpha} = 10^{-4}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線は、実験値に対して近い傾向となり、あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  となる。また、 $D_{\alpha}$  を幾何平均値 ( $D_{\alpha} = 2.6 \times 10^{-4}$  mm) とするとき、その精度は  $W_v \pm 0.05$  となることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) Hazen, A.: Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to Their Use in Filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, pp.539-556, 1983.
- 2) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 3) Kitamura, R., and Sako, K.: Unsaturated soil mechanics with probability and statics, CRC Press, USA, 2020.
- 4) Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., Wilson, G. W.: An equation to represent grain-size distribution, *Can. Geotech. J.*, 37, pp.817-827, 2000.
- 5) Hwang, S. I.: Effect of texture on the performance of soil particle-size distribution models, *Geoderma*, 123, pp.363-371, 2004.

## 第5章 提案手法の妥当性の検討のための保水性試験

### 5.1 本章の概要

本章では第3章と第4章で提案した間隙径分布の導出手法の評価を行うために、不飽和浸透特性の室内試験を実施した。第3章では、平行移動指数  $I_{pt}[\%]$  と細粒分含有率、均等係数に關係があることが示され、粒度特性値から平行移動指数を算出し間隙径分布を導出する手法を提案した。第4章では、シラスを含む砂質土に対して、素体積高さ  $D_{cha}$  が粒度特性値（細粒分含有率  $F_c$ 、均等係数  $U_c$ ）と關係があることが明らかとなり、最小粒径  $D_a$  は砂質土の  $F_c < 10$ 、 $10 < U_c < 100$  の範囲で  $10^{-4} < D_a [\text{mm}] < 10^{-3}$  の傾向があることが明らかとなり、最小粒径  $D_a$  から素体積高さ  $D_{cha}$  を算出し、間隙径分布を導出する方法を提案した。本章では、間隙径分布を推定する手法の評価を行うために、連続加圧型加圧板法による保水性試験を実施した。加えて、連続加圧型加圧板法の測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良と、試験装置の安定性の向上を目的とした、吸排水の測定機構の改良を行ったため、その改良効果についても述べる。

### 5.2 連続加圧型加圧板法の概要

連続加圧型加圧板は、加圧法に含まれる保水性試験である。供試体に正の圧力を負荷させることで、土中から水分を排水させ、土中の水分移動がなくなった時を平衡状態とする。そのときに負荷させた空気圧と間隙水圧の測定値からサクションを計算し、供試体内の含水比を測定することで水分特性曲線を得る試験法である。供試体内に小型のテンシオメータを設置し、土中の間隙水圧を常に測定することで、排水中から平衡状態に至るまでのサクションの値を得ることができる。また、供試体からの排水量を電子天秤で測定することで、供試体内の含水比が計算されるため連続した水分特性曲線を得ることが可能である。連続加圧型加圧板法は地盤工学会<sup>1)</sup>で標準化されている従来法の段階加圧型と比べて、平衡状態の確認する必要が無いため試験時間の大幅な短縮が可能となっている<sup>2)</sup>。しかし、Fredlund<sup>3)</sup>は加圧板法に用いられるセラミック板に関して、セラミック板の透水性が低い場合、供試体からの排水が遅れることにより、間隙水圧の応答速度が遅れることを報告している。そのため、供試体内の間隙水圧を常に測定する連続加圧型加圧板法においては、間隙水圧の反応性の遅れによって、計測される保水性試験結果に影響を及ぼしていることが懸念される。山本ら<sup>4)</sup>は連続加圧型加圧板法の妥当性を検討するために、サクション制御後の間隙水圧の変動を観察した。セル圧を一定条件で制御し、土中の間隙水圧の変動を観察した結果、セル圧制御直後に、制御したセル圧（間隙空気圧）に対して、土中の間隙水圧の計測に応答速度の遅れ（時間遅れ）が生じており、時間遅れによって水分特性曲線の測定精度の低下が引き起こされていることを指摘している。また、セラミック板の透水性が低い場合、供試体からの排水に時間を要し、試験時間が長期化する<sup>1)</sup>。

また、京野ら<sup>5)</sup>によると大気圧下において、供試体からの排水量の測定にロードセル型の電子天秤を使用する場合、大気圧の変動により測定結果に影響を及ぼすことが指摘されている。加えて、長期間にわたり電子天秤を圧力チャンバー内に設置する際に、圧力チャンバー内が常に湿潤状態となるため、電子天秤が故障する可能性が生じる。

これらの点を踏まえて、本研究では連続加圧型加圧板法の測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした間隙水圧測定部および供試体底部の装置改良と、試験装置の安定性の向上を目的とした、吸排水

の測定機構の改良を行った。

### 5.3 測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良

#### 5.3.1 間隙水圧測定部の改良

本節は、石ら<sup>6)9)</sup>の研究を基に連続加圧型加圧板法の試験装置の改良について整理する。図 5.3.1 に山本ら<sup>4)</sup>が使用した連続加圧型加圧板法の試験装置の概要を示す。図 5.3.2 にセラミック付きペDESTAL を示す。ペDESTAL には排水用および計測用として、厚さ 5mm のセラミック板が設置されている。セラミックの板の中心部 (CD-1) から接続されている経路は間隙水圧計に接続されており、セラミック板の外側は圧力チャンバー内の吸排水容器に接続されている。圧力セル内に間隙空気圧  $u_{a,CP}$  としてセル圧を負荷させて、排水容器と電子天秤が入った圧力チャンバーに間隙水圧  $u_{w,BP}$  として一定の背圧を負荷させることでサクシオン制御を行う。

山本らは連続加圧型加圧板法のサクシオン制御時にセル圧 (空気圧) に対して間隙水圧の応答が遅れることを確認し、その要因はセラミック板の低透水性によると考察している。また、山本らの装置は間隙水圧を底部で測定しているため、サクシオン制御時に、底部に間隙水が貯留することにより、間隙水圧の測定に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、間隙水圧の測定箇所を底部のセラミックから中央部のセラミック製ポーラスカップに改良した。図 5.3.3 に改良した試験装置の概要と、図 5.3.4 に中央の間隙水圧測定部のポーラスカップを示す。セラミック製ポーラスカップ (CPC-1) は、直径が 8mm、厚さが 1.8mm、空気侵入値が約 385kPa のものを使用した。間隙水圧を中央部で測定することが可能となるため、間隙水圧の測定における底部に貯留する水の影響が減少することや、供試体の中央部で測定することが可能となるため、供試体の平均的な間隙水圧を得られるという特徴がある。表 5.3.1 に供試体底部のセラミック板の性能を示し、表 5.3.2 には測定部のセラミック板とポーラスカップの性能を示す。

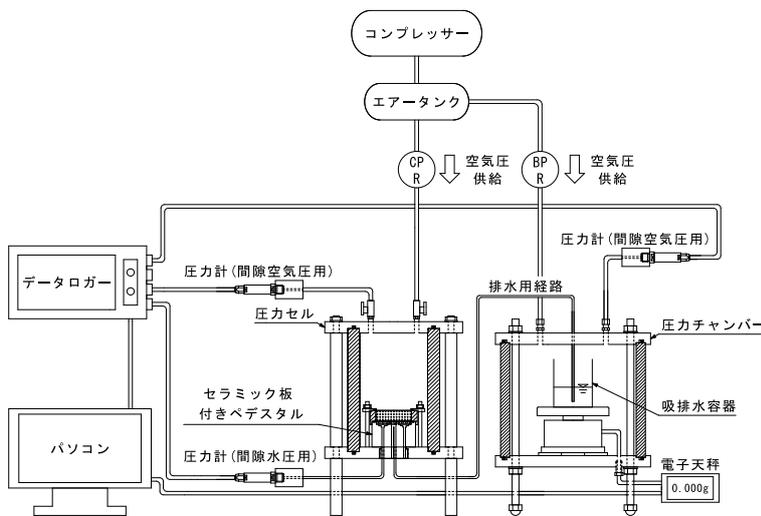


図 5.3.1 加圧板法試験装置 (Ver.1) <sup>4)</sup>

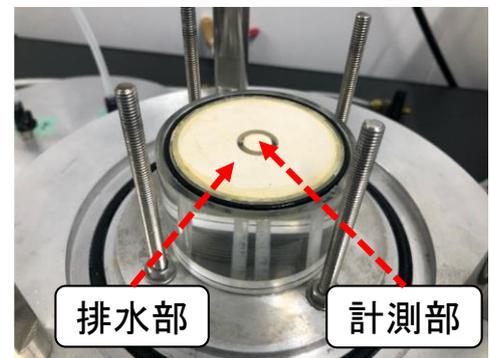


図 5.3.2 セラミック板付きペDESTAL

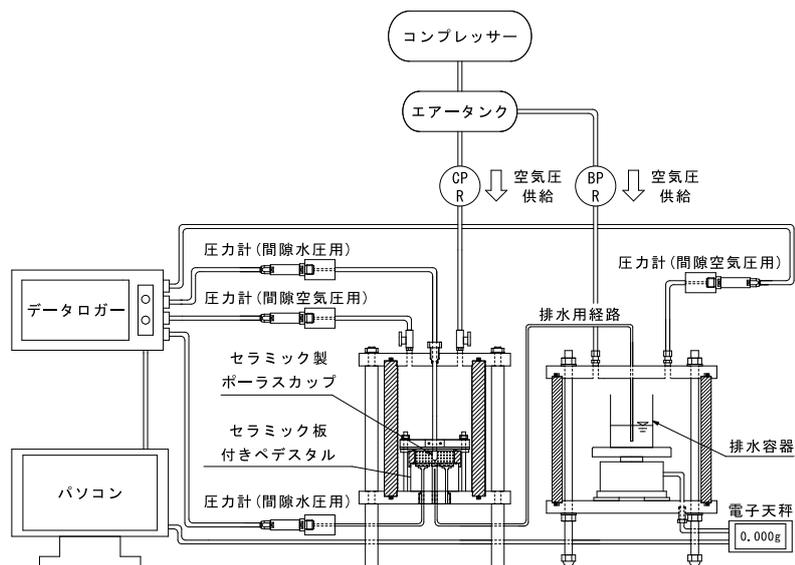


図 5.3.3 加圧板法試験装置 (Ver.2)



図 5.3.4 セラミック製ポラスカップ (CPC-1)

表 5.3.1 供試体底部のセラミック板の性能

	CD-1	CD-2	CD-3	MB
厚さ	5mm	3mm	3mm	0.45 $\mu$ m
直径 (mm)	60	46	46	52
空気侵入値 (kPa)	106	440	76	130
透水係数 (m/sec)	$5.78 \times 10^{-9}$	$1.25 \times 10^{-9}$	$1.43 \times 10^{-7}$	$4.97 \times 10^{-11}$
毎分透水量 (at 75kPa) (g/min)	0.8	0.3	37.4	74.6

表 5.3.2 間隙水圧測定部の性能

	CD-1	CPC-1	CPC-2
厚さ (mm)	5	1.8	1.8
直径 (mm)	11	8	8
長さ (mm)	-	15	15
空気侵入値 (kPa)	106	380	360

まず、間隙水圧の計測位置の違いが計測結果に与える影響を考察するために、水に対する間隙水圧の反応性の検討を行った。図 5.3.3 に示すモールド内に水を貯め、50kPa の空気圧を負荷して、間隙水圧の反応性を確認した。図 5.3.5 に空気圧と間隙水圧の時系列変化を示す。測定部にはそれぞれ、底部 (CD-1)、中央部 (CPC-1) を用いており、排水部のセラミック板は CD-1 を用いている。図に示すように、底部に設置したセラミック板の間隙水圧  $u_{w, \text{bottom}}$  は、負荷した空気圧に達するまで 27 分の時間遅れが生じた。一方で、中央部に設置したセラミック製ポラスカップで計測された間隙水圧  $u_{w, \text{center}}$  は時間遅れが生じなかった。このことから、中央部で間隙水圧を測定することが、間隙水圧の反応性の遅れの改善に

有効であることが示された。

また、本検討では、間隙水圧の時間遅れを、セル圧制御後の間隙水圧が最大値に対するまでの時間と定義した。間隙水圧はセル圧や背圧の変動により変化することから、間隙水圧の最大値のみで判断することはできない。例えば、あるセル圧で間隙水圧が最大値に達し、平衡していた後にレギュレータの不良などによって、セル圧の上昇に伴って間隙水圧が変動した場合、その変動は時間遅れに含まないとした。

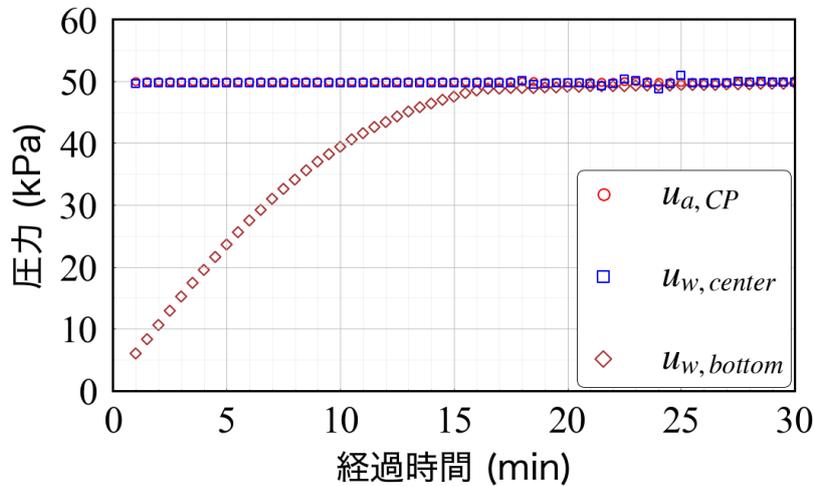


図 5.3.5 空気圧と間隙水圧の時系列変化

### 5.3.2 間隙水圧の測定位置に関する装置改良効果の検討

保水性試験を実施することで試験装置の改良効果について議論する。試料には、鹿児島県鹿児島市東俣町の土取り場（写真 5.3.1）から採取したシラスを含む砂質土（以下、東俣シラス-a）と豊浦砂を用いた。東俣シラス-a と豊浦砂の粒径加積曲線を図 5.3.6 に示す。東俣シラス-a ( $\rho_s = 2.64 \text{ Mg/m}^3$ ) は火山灰質礫質砂 (SVG)，豊浦砂 ( $\rho_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$ ) は砂 (S) に分類される。東俣シラス-a に対しては、図 5.3.3 に示す装置を用いて、同供試体で供試体底部の間隙水圧  $u_{w, bottom}$  と中央部の間隙水圧  $u_{w, center}$  を同時に計測した。豊浦砂に対しては、近しい条件で供試体を作製し、図 5.3.1 に示す装置で底部の間隙水圧  $u_{w, bottom}$  を測定した試験結果と、図 5.3.3 に示す装置で中央部の間隙水圧  $u_{w, center}$  を測定した試験結果を用いて議論する。

表 5.3.3 に東俣シラス-a の保水性試験条件を示す、供試体は、初期含水比  $w_0 = 37.7\%$  で調整し小型のランマーを用いて 1 層につき 30 回、3 層で締固めを行った。サクシオン制御はセル圧  $45 \text{ kPa} \rightarrow 60 \text{ kPa} \rightarrow 75 \text{ kPa} \rightarrow 90 \text{ kPa}$  とし、背圧は  $30 \text{ kPa}$  で一定とした。また、電子天秤で測定される排水量の変化が  $0.01 \text{ g/hour}$  以下となった時を平衡状態とした。図 5.3.7 に、底部の間隙水圧  $u_{w, bottom}$  から得られた水分特性曲線と中央部の間隙水圧  $u_{w, center}$  から得られた水分特性曲線を示し、表 5.3.4 に各サクシオンにおける間隙水圧の時間遅れを示す。各サクシオン制御段階で間隙水圧の時間遅れを観察したところ、セル圧  $0 \rightarrow 45$ ,  $45 \rightarrow 60$ ,  $60 \rightarrow 75$ ,  $75 \rightarrow 90 \text{ (kPa)}$  の各制御段階において、供試体底部  $u_{w, bottom}$  では 8 分、5 分、3 分、1 分の時間遅れが生じており、供試体中央部  $u_{w, center}$  では時間遅れが生じなかった。改良前の水分特性曲線  $s_{u, bottom}$  は、間隙水圧の時間遅れの影響を受けており、改良後の水分特性曲線  $s_{u, center}$  では改善効果がみられる。このことから、東俣シラス-a の保水性試験に関しては、間隙水圧の計測場所を底部から中央部に改良したことで、

間隙水圧の時間遅れが改善されたことから、装置の改良効果があったものと考えられる。なお、改良後の水分特性曲線において、他の結果からずれた値 ( $w=30.5\%$ ,  $s_{u,center}=39.7\text{kPa}$ ) が 1 点得られた。この値はセル圧を  $60 \rightarrow 75\text{kPa}$  に変動させている途中に計測された値であり、圧力制御中に計測タイミングが重なったことが原因と考えられる。



写真 5.3.1 鹿児島県鹿児島市東俣町の土取り場

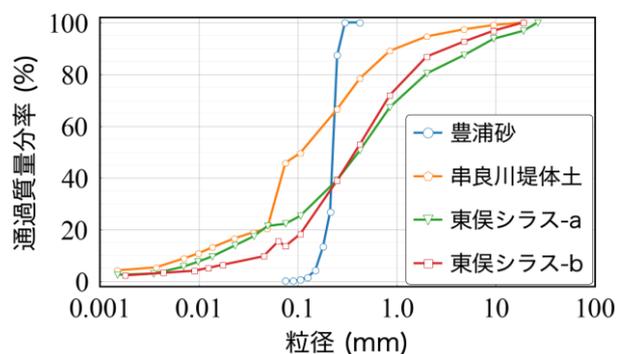


図 5.3.6 粒径加積曲線

表 5.3.3 東俣シラス-a の保水性試験条件

試験装置			Ver.2	
間隙水圧の計測位置			$u_{w,bottom}$	$u_{w,center}$
排水部			CD-1	
モールドの体積		$V$ (cm <sup>3</sup> )	56.5	
締固め時	間隙比	$e$ -	1.06	
	含水比	$w$ (%)	37.7	
サクシオン制御	セル圧	$u_{a,CP}$ (kPa)	45 → 60 → 75 → 90	
	背圧	$u_{w,BP}$ (kPa)	30	
平衡状態	排水量の時間変化	(g/hour)	0.01以下	
排水性能	空気侵入値	$AEV$ (kPa)	106	
	透水係数	$k$ (m/sec)	$5.78 \times 10^{-9}$	
	毎分透水量(at 75kPa)	(g/min)	0.8	

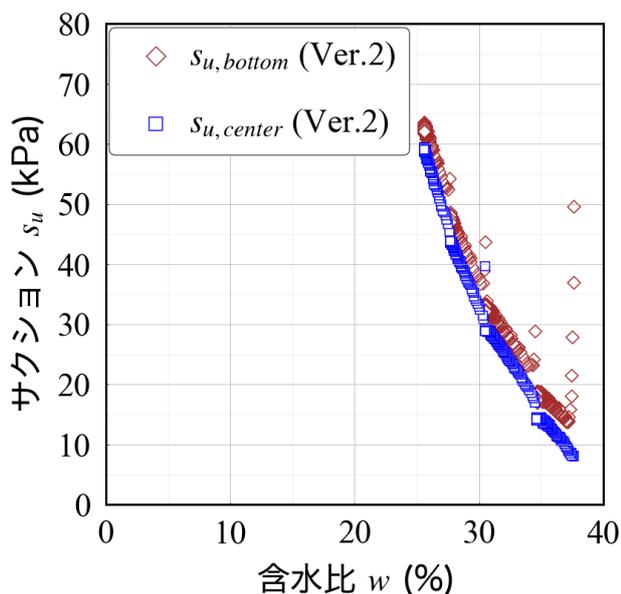


図 5.3.7 水分特性曲線（東俣シラス-a）

表 5.3.4 間隙水圧の時間遅れ（東俣シラス-a）

間隙水圧の時間遅れ (min)			
計測位置		$u_{w,bottom}$	$u_{w,center}$
$u_{a,CP}$	0 → 45 (kPa)	8	0
$u_{a,CP}$	45 → 60 (kPa)	5	0
$u_{a,CP}$	60 → 75 (kPa)	3	0
$u_{a,CP}$	75 → 90 (kPa)	1	0

次に豊浦砂の試験結果について述べる．表 5.3.5 に豊浦砂の保水性試験条件を示す．図 5.3.1 に示す装置で底部の間隙水圧  $u_{w,bottom}$  を測定した試験結果と，図 5.3.3 に示す装置で中央部の間隙水圧  $u_{w,center}$  を測定した試験結果を用いた．供試体は，初期含水比  $w_0=25.0\%$  で調整し小型のランマーを用いて 1 層につき 30 回，3 層で締め固めを行った．サクシオン制御はセル圧 55kPa→60kPa とし，背圧は 50kPa で一定とした．また，電子天秤で測定される排水量の変化が 0.01g/hour 以下となった時を平衡状態とした．図 5.3.8 に，底部の間隙水圧  $u_{w,bottom}$  から得られた水分特性曲線と中央部の間隙水圧  $u_{w,center}$  から得られた水分特性曲線を示し，表 5.3.6 に各サクシオンにおける間隙水圧の時間遅れを示す．各サクシオン制御段階で間隙水圧の時間遅れを観察したところ，セル圧 0→55，55→60(kPa)の各制御段階において，供試体底部  $u_{w,bottom}$  では 221 分，107 分の時間遅れが生じており，供試体中央部  $u_{w,center}$  では 118 分，3 分の時間遅れが生じた．間隙水圧の計測場所を底部から中央部にすることで，間隙水圧の時間遅れは軽減されたが，完全には改善されず，中央部の計測結果においても時間遅れが生じていることを確認した．両者から得られた水分特性曲線は，間隙水圧の時間遅れの影響を受け，一般的な水分特性曲線で観測されない値が示されている．

このような結果が得られた要因として，土の透水性とセラミック板の排水性能の関係から，本来排水されるべき水が排水されず，間隙水圧の計測に影響を及ぼしたと考えられる．図 5.3.9 にセル圧制御直後における貯留した間隙水の概要図を示す．セル圧制御直後において，土中の間隙水はセラミック板を通過して排水されるが，セラミック板の透水係数が低いことから，間隙水が排水されきらず底部に溜まる．この際，豊浦砂のような透水性の高い土は，この底部に溜まる間隙水が多くなる．そして，この貯留水が間隙水圧の計測に影響を及ぼし，時間遅れが改善されなかったと考えられる．

表 5.3.5 豊浦砂の保水性試験条件

試験装置			Ver.1	Ver.2
間隙水圧の計測位置			$u_{w,bottom}$	$u_{w,center}$
排水部			CD-1	
モールドの体積			$V$ (cm <sup>3</sup> )	56.5
締固め時	間隙比	$e$ -	0.73	0.75
	含水比	$w$ (%)	24.9	23.5
サクシヨン制御	セル圧	$u_{a,CP}$ (kPa)	55 → 60	
	背圧	$u_{w,BP}$ (kPa)	50	
平衡状態	排水量の時間変化	(g/hour)	0.01以下	
排水性能	空気侵入値	$AEV$ (kPa)	106	
	透水係数	$k$ (m/sec)	$5.78 \times 10^{-9}$	
	毎分透水量(at 75kPa)	(g/min)	0.8	

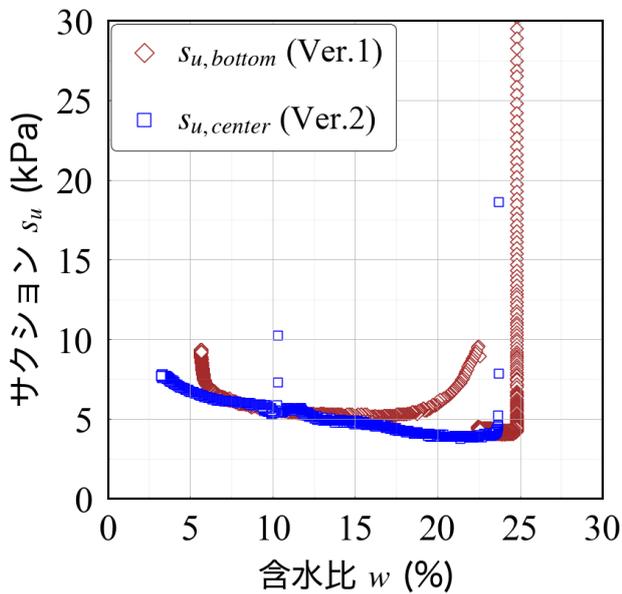


図 5.3.8 水分特性曲線 (豊浦砂)

表 5.3.6 間隙水圧の時間遅れ (豊浦砂)

間隙水圧の時間遅れ (min)			
計測位置		$u_{w,bottom}$	$u_{w,center}$
$u_{a,CP}$	0 → 50 (kPa)	221	118
$u_{a,CP}$	55 → 60 (kPa)	107	3

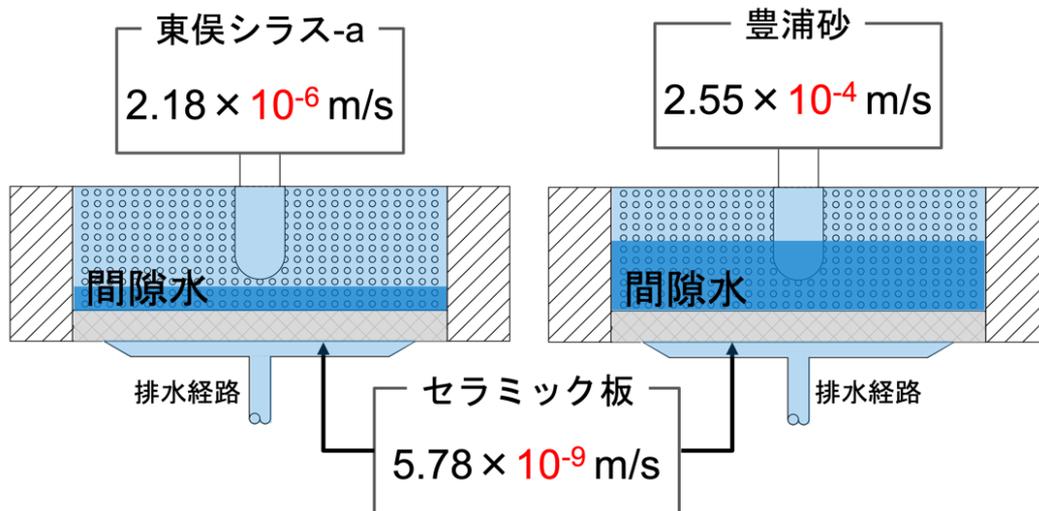


図 5.3.9 底部の貯留水の概要図

### 5.3.3 排水部の装置改良

前項で，供試体の底部に溜まった間隙水が間隙水圧の計測に影響を及ぼすことで，間隙水圧の時間遅れが生じる可能性が考えられた．加えて，セラミック板の透水性が低い場合，供試体からの排水に時間を要し，試験時間が長期化する可能性がある．そこで，西村ら<sup>10)</sup>の研究を参考にして，セラミック板付きペDESTALの部分を，排水性の高い微細多孔質膜（MB）に改良した．図 5.3.10 に改良前の試験装置（以下，加圧板法）の概要と，図 5.3.11 に改良後の試験装置（以下，加圧膜法）の概要を示す．図 5.3.10 に示す加圧板法の装置は，図 5.3.3 の試験装置の供試体サイズを変更したものである．供試体は直径 50mm，高さ 51mm であり，不攪乱試料を採取するためのモールドを設置することが可能なため，不攪乱試料の保水性試験を実施することや，同じサイズのモールドを用いて透水試験を実施することが可能となる．写真 5.3.2，写真 5.3.3 に改良前と改良後のペDESTALを示す．改良前のセラミック板付きペDESTALは，試料によって使い分けられるように空気侵入値や透水係数の異なる 2 種類のセラミック板（CD-2，CD-3）を用意している．改良後の加圧膜法の微細多孔質膜を用いたペDESTALには，供試体支持と微細多孔質膜を水平に敷くためにポーラスストーンが設置されている．セラミック板（CD-2，CD-3），微細多孔質膜（MB）の性能を表 5.3.2 に示す．微細多孔質膜（MB）の透水係数は，セラミック板（CD-2，CD-3）に比べて最も小さいが，膜厚が 0.45 μm と非常に薄いことから，セル圧 75kPa 負荷時の毎分透水量は最も大きいことがわかる．

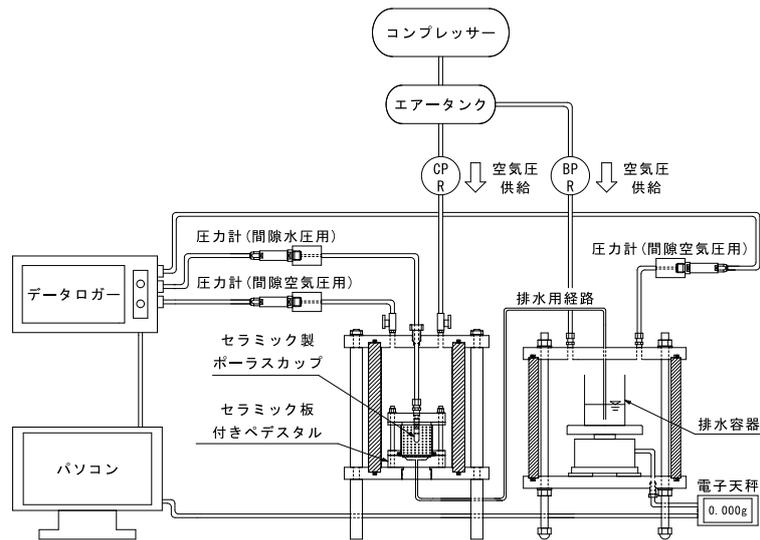


図 5.3.10 加圧板法試験装置 (Ver.3)

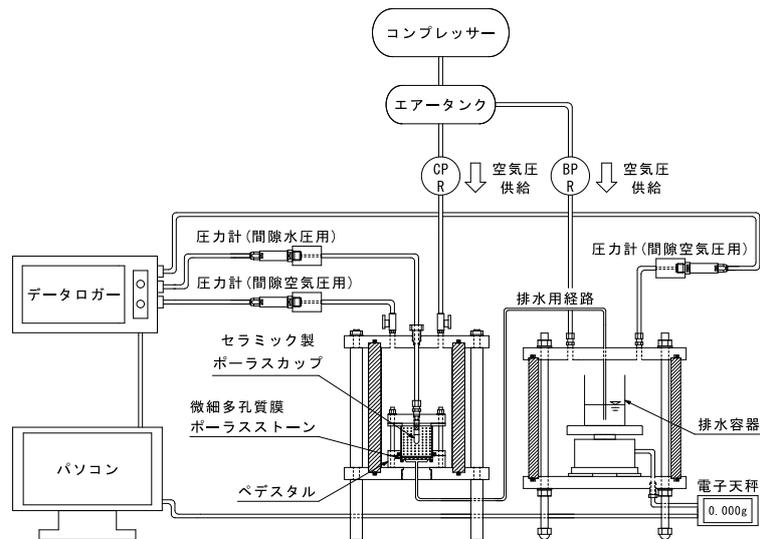


図 5.3.11 加圧膜法試験装置 (Ver.4)

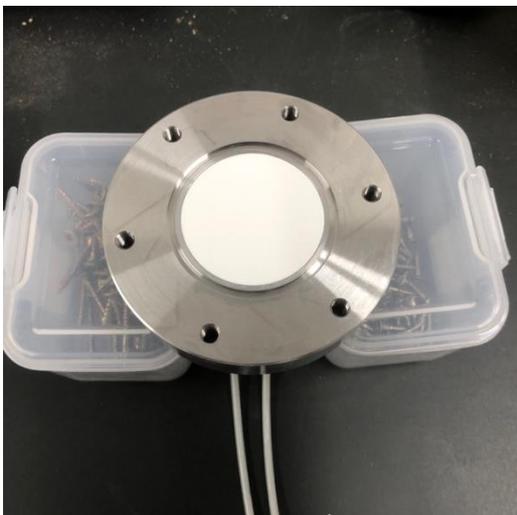


写真 5.3.2 セラミック板付きペデスタル

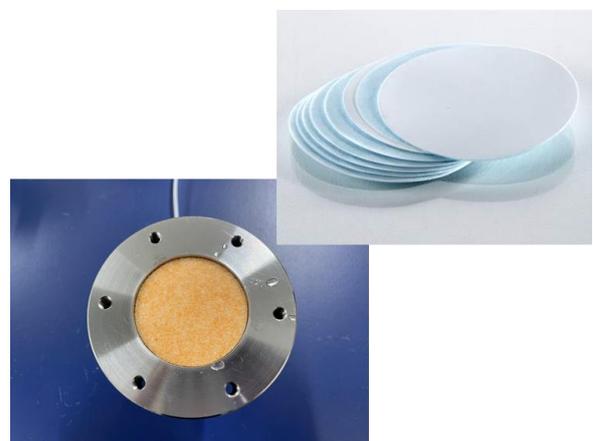


写真 5.3.3 ペデスタル (ポラスストーン+MB)

### 5.3.4 排水部の改良効果の検討

保水性試験を実施することで試験装置の改良効果について議論する。試料には、鹿児島県鹿児島市東俣町の土取り場（写真 5.3.1）から採取したシラスを含む砂質土（以下、東俣シラス-b）と豊浦砂を用いた。東俣シラス-b と豊浦砂の粒径加積曲線を図 5.3.6 に示す。東俣シラス-b ( $\rho_s = 2.37 \text{ Mg/m}^3$ ) は火山灰質礫まじり砂 (S-VG) に分類される。改良前の加圧板法の試験装置では、東俣シラス-b は CD-2、豊浦砂は CD-3 のセラミック板付きペDESTALを用いている。また、間隙水圧は両者の試験共に、中央部で測定しており、セラミック製のポーラスカップは CPC-2 を用いている。

表 5.3.7 に東俣シラス-b の保水性試験条件を示す。供試体は初期含水比  $w_0 = 25\%$  で作成し、水浸脱気法<sup>1)</sup>によって飽和度を高めた。サクシオン制御はセル圧 40kPa→50kPa→60kPa→80kPa→100kPa とし、背圧は 30kPa で一定とした。また、電子天秤で測定される排水量の変化が 0.01g/hour 以下となった時を平衡状態とした。加圧板法と加圧膜法で試験開始時の初期含水比が異なっていることがわかるが（表 5.3.7）、この要因は供試体の水浸脱気後の上澄み水の水量の違いに起因していると考えられる。図 5.3.12 に加圧板法と加圧膜法の水分特性曲線を示す。セル圧 0→40, 40→50, 50→60, 60→80, 80→100 (kPa) の各制御段階における時間遅れは、加圧板法では 19 分, 19 分, 17 分, 24 分, 42 分であり、加圧膜法では 2 分, 4 分, 57 分, 270 分, 517 分であった（表 5.3.8）。特に排水量が多くなる第一制御段階および第二制御段階においては、装置改良によって排水性能が向上し、時間遅れに及ぼす影響を軽減できたと考えられる。しかし、第三制御段階以降では、より時間遅れが生じる結果が示された。この要因に関しては、更なる試験実施等を重ねて考察する必要がある。なお、両者の水分特性曲線は、時間遅れの影響を受けている箇所があるが、概ね一致していることが確認された。

表 5.3.9 には、各サクシオン制御段階における平衡状態に達するまでの時間を示す。各制御段階におけるサクシオンが平衡状態に達するまでの時間を観察したところ、加圧板法では 2,347 分, 1,623 分, 1,419 分, 1,195 分, 944 分の時間を要しており、加圧膜法では 368 分, 1160 分, 1,943 分, 1,620 分（セル圧 80→100(kPa) の制御段階では排水量が常に微小変動しており、平衡状態に達するまでの時間を確認できなかった）であった。特に排水量が多くなる第一制御段階においては、装置改良によって排水性能が向上し、平衡状態に達するまでの時間を短縮できたと考えられる。しかし、以降の制御段階においては、微小に排水され続けていたため平衡状態に達するまでの時間を要したと考えられる。

表 5.3.7 東俣シラス-b の保水性試験条件

			加圧板法	加圧膜法
試験装置			Ver.3	Ver.4
排水部			CD-2	MB
間隙水圧の計測位置			$u_{w,center}$	
モールドの体積		$V$ (cm <sup>3</sup> )	100.1	
締固め時	間隙比	$e$ -	1.03	1.08
	含水比	$w$ (%)	25.0	25.0
	飽和度	$S_r$ (%)	57.7	54.9
試験開始時	間隙比	$e$ -	1.02	1.06
	含水比	$w$ (%)	42.9	48.6
	飽和度	$S_r$ (%)	99.8	108.7
サクシヨン制御	セル圧	$u_{a,CP}$ (kPa)	40 → 50	
	背圧	$u_{w,BP}$ (kPa)	30	
平衡状態	排水量の時間変化	(g/hour)	0.01以下	
排水性能	空気侵入値	$AEV$ (kPa)	440	130
	透水係数	$k$ (m/sec)	$1.25 \times 10^{-9}$	$4.97 \times 10^{-11}$
	毎分透水量(at 75kPa)	(g/min)	0.3	74.6

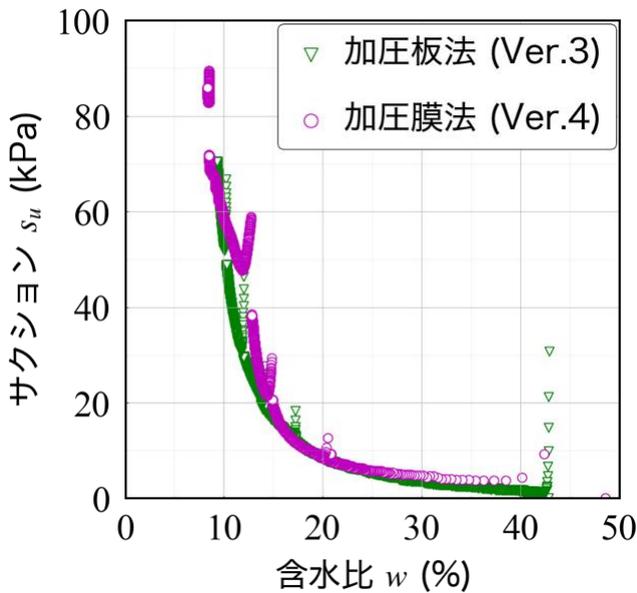


図 5.3.12 水分特性曲線 (東俣シラス-b)

表 5.3.8 各サクシヨン制御段階における間隙水圧の時間遅れ (東俣シラス-b)

		加圧板法	加圧膜法
$u_{a,CP}$	0 → 40 (kPa)	19	2
$u_{a,CP}$	40 → 50 (kPa)	19	4
$u_{a,CP}$	50 → 60 (kPa)	17	57
$u_{a,CP}$	60 → 80 (kPa)	24	270
$u_{a,CP}$	80 → 100 (kPa)	42	517

表 5.3.9 各サクシオン制御段階における平衡状態に達するまでの時間（東俣シラス-b）

	加圧板法	加圧膜法
$u_{a,CP}$ 0 → 40 (kPa)	2347	368
$u_{a,CP}$ 40 → 50 (kPa)	1623	1160
$u_{a,CP}$ 50 → 60 (kPa)	1419	1943
$u_{a,CP}$ 60 → 80 (kPa)	1195	1620
$u_{a,CP}$ 80 → 100 (kPa)	944	※

次に豊浦砂の試験結果について述べる．表 5.3.10 に豊浦砂の保水性試験条件を示す．供試体は初期含水比  $w_0=25\%$  で作成し，水浸脱気法によって飽和度を高めた．サクシオン制御はセル圧 55kPa→60kPa とし，背圧は 50kPa で一定とした．また，電子天秤で測定される排水量の変化が 0.01g/hour 以下となった時を平衡状態とした．図 5.3.13 に加圧板法と加圧膜法の水分特性曲線示す．セル圧 0→55，55→60(kPa) の各制御段階における時間遅れは，加圧板法では 2分，0分，加圧膜法では 1分，0分であり（表 5.3.11），装置改良によって排水性能が向上し，時間遅れに及ぼす影響を軽減できたと考えられる．両者の水分特性曲線は，間隙比の違いから残留含水比に差異が生じており，時間遅れの影響を受けている箇所があるが，概ね一致している．

表 5.3.12 に各サクシオン制御段階における平衡状態に達するまでの時間を示す．各制御段階におけるサクシオンが平衡状態に達するまでの時間を観察したところ，加圧板法では 2,126分，1,401分要してお

表 5.3.10 保水性試験条件（豊浦砂）

			加圧板法	加圧膜法
試験装置			Ver.3	Ver.4
排水部			CD-3	MB
間隙水圧の計測位置			$u_{w,center}$	
モールドの体積 $V$ (cm <sup>3</sup> )			100.1	
締固め時	間隙比 $e$	-	0.75	0.75
	含水比 $w$	(%)	25.0	25.0
試験開始時	間隙比 $e$	-	0.70	0.66
	含水比 $w$	(%)	28.1	28.7
サクシオン制御	セル圧 $u_{a,CP}$	(kPa)	55 → 60	
	背圧 $u_{w,BP}$	(kPa)	50	
平衡状態	排水量の時間変化 (g/hour)		0.01以下	
排水性能	空気侵入値 $AEV$	(kPa)	76	130
	透水係数 $k$	(m/sec)	$1.43 \times 10^{-7}$	$4.97 \times 10^{-11}$
	毎分透水量(at 75kPa) (g/min)		37.4	74.6

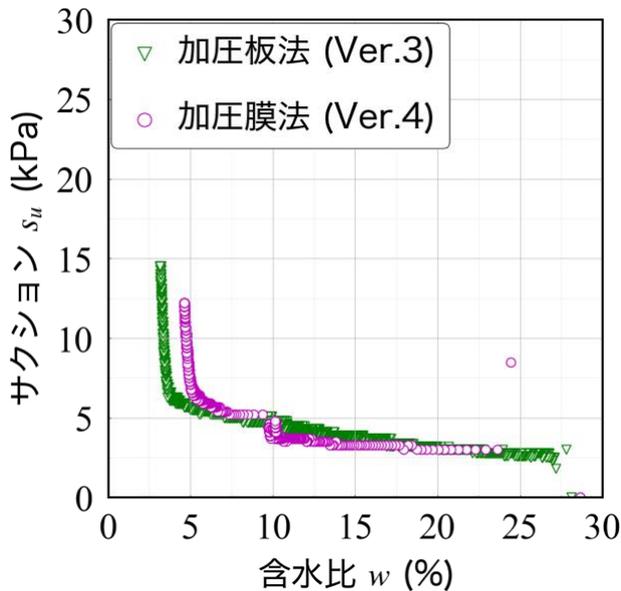


図 5.3.13 水分特性曲線（豊浦砂）

表 5.3.11 各サクシオン制御段階における間隙水圧の時間遅れ（豊浦砂）

	加圧板法	加圧膜法
$u_{a,CP}$ 0 → 55 (kPa)	2	1
$u_{a,CP}$ 55 → 60 (kPa)	0	0

表 5.3.12 各サクシオン制御段階における平衡状態に達するまでの時間（豊浦砂）

	加圧板法	加圧膜法
$u_{a,CP}$ 0 → 55 (kPa)	2126	609
$u_{a,CP}$ 55 → 60 (kPa)	1401	1276

り、加圧膜法では 609 分、1,276 分と短縮されたことから、加圧膜法は試験時間の短縮化が期待される。

これらの結果から、加圧板法から加圧膜法へ改良することにより、特に排水量の多いサクシオン制御段階において、間隙水圧の時間遅れを軽減することができる可能性が示唆された。また、排水量の多いサクシオン制御段階において、平衡状態となる時間も短いことから、試験時間の短縮化が期待される。

## 5.4 試験装置の安定性向上を目的とした試験装置の改良

### 5.4.1 吸排水測定機構の改良

一般的に、加圧板法には吸排水を測定する部分に電子天秤を用いている<sup>2,4,6-9)</sup>。電子天秤にはロードセル型や電磁平衡式がある。電子平衡式は精度が高く、大気圧の変動等の影響を受けにくい<sup>12)</sup>が、小型化が難しく高価であることから、土質試験においてはロードセル型の電子天秤が広く用いられている。京野ら<sup>5)</sup>によると、大気圧下において供試体からの排水量の測定にロードセル型の電子天秤を使用する場合、長期間の測定では、大気圧の変動により測定結果に影響を及ぼすことが指摘されている。加えて、長期間にわたり電子天秤を圧力チャンバー内に設置する際に、圧力チャンバー内が常に湿潤状態となるため、電子天秤が故障する可能性が生じる。本研究期間においても、電子天秤が何度か故障し、その度に交換を行ったことから、試験装置の安定性およびメンテナンス性を向上させるために、吸排水の測定機構の改良を実施した。改良前の試験装置の吸排水の機構には、ロードセル式の電子天秤（エー・アンド・デイ社、HF-400）を用いている。しかし本研究で用いた試験装置は、電子天秤を圧力チャンバーに設置し、試験時には背圧を一定で負荷させていることから、京野ら<sup>5)</sup>の指摘にあるような大気圧の変動

の影響を受けづらい装置となっている。電子天秤に重りを載せて、背圧を負荷させたところ、測定値が安定することが確認した。

本研究では、地盤材料試験の方法と解説、第3編7章 土の保水性試験<sup>1)</sup>を参考に加圧板法の吸排水の機構に電子天秤を用いたものから、二重管ビュレットと差圧計を組み合わせた機構に改良した。図5.4.1に改良された試験装置を示す。二重管ビュレットの内側円管には目盛りが付いており、供試体底部のセラミック板付きペダスタルに接続されているため、サクション制御に伴う供試体からの排水は内側の円管に流入する。外側の円管の水位を基準として、外側と内側の水位差を差圧計で測定することで、供試体からの吸排水を測定する。また、電子天秤の吸排水の測定機構と同様に背圧を負荷させている。

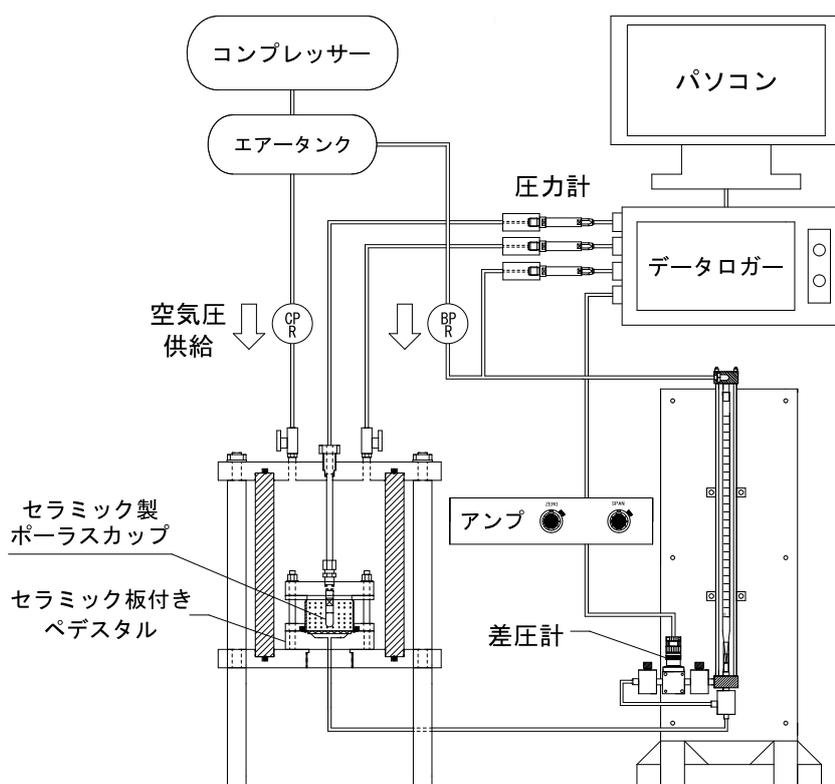


図 5.4.1 加圧板法試験装置 (二重管ビュレット+差圧計)

#### 5.4.2 吸排水の測定機構の違いに伴う試験結果の比較

両者の試験装置（図 5.3.10，図 5.4.1）は排水量を測定する構造が異なるため，両者の試験装置の試験結果に差異が生じていないか確認を行った．試料には豊浦砂（ $\rho_s = 2.65 \text{Mg/m}^3$ ）を用いて，初期含水比  $w_0 = 25\%$  で調整し小型のランマーを用いて 1 層につき 30 回，3 層で締固めを行った．供試体作製後に，水浸脱気法<sup>11)</sup>により飽和度を高めた．サクシオン制御はセル圧 55kPa→60kPa とし，背圧は 50kPa で一定とした．豊浦砂は比較的透水性が高い試料であるため，供試体底部のセラミック板には CD-3（表 5.3.2）を用いた．図 5.4.2 に示す吸排水側に電子天秤を用いた装置においては，前節と同様に排水量の変化が 0.01g/hour 以下となった時を平衡状態とし，図 5.4.1 に示す吸排水側に二重管ビュレットと差圧計を用いた装置では差圧計で得られる電圧の変化量が 0.0V/hour となった時を平衡状態と仮定し，平衡状態を確認した後にセル圧を変化させた．試験終了後に供試体の含水比を測定して，電子天秤と二重管ビュレットと差圧計から得られた排水量を逆算することで体積含水率  $W_v$  を計算した．水浸脱気時や試験終了時に供試体の高さに変化が無いことが確認されたため，試験中の供試体の体積変化は無視することとした．また，本試験では排水過程のみを実施している．

図 5.4.2 に両者の試験装置の豊浦砂の試験結果を示す．両者の試験結果を比較すると，試験開始時の初期含水比が異なっていることから，高体積含水率域でややずれが生じているが，概ね試験結果の傾向は一致していることがわかる．試験開始時の初期含水比  $w_0$  は，吸排水側に電子天秤を用いた試験結果で  $w_0 = 28.1\%$ ，吸排水側に二重管ビュレットと差圧計を用いた試験結果では  $w_0 = 26.3\%$  であった．これは，供試体の水浸脱気後の上澄み水の水量の違いに起因していると考えられる．表 5.4.1 に各サクシオン制御段階における平衡状態に達するまでの時間と，各サクシオン制御段階における供試体からの排水量と含水比を示す．平衡状態に達するまでの時間を比較すると，セル圧 55kPa，60kPa の各段階において，電子天秤を用いた試験よりも，二重管ビュレットと差圧計を用いた試験の方が短いことがわかる．本試験で用いた差圧計（Validayne 社，DP15）の測定レンジは 0～±5.5kPa であり精度は±0.25%F.S であるため，二重管ビュレットから得られる排水量に換算すると，排水量の測定精度はおよそ±0.11g となり，電子天秤（エー・アンド・デイ社，HF-400）の測定精度±0.003 よりも測定精度低いことが起因していると考えられる．差圧計の方が平衡状態とみなすまでの時間が短くなる傾向があるものの，水分特性曲線の傾き等がおおむね一致しているため，以降の検討では吸排水機構の違いに関わらず同様の試験結果として扱うこととした．

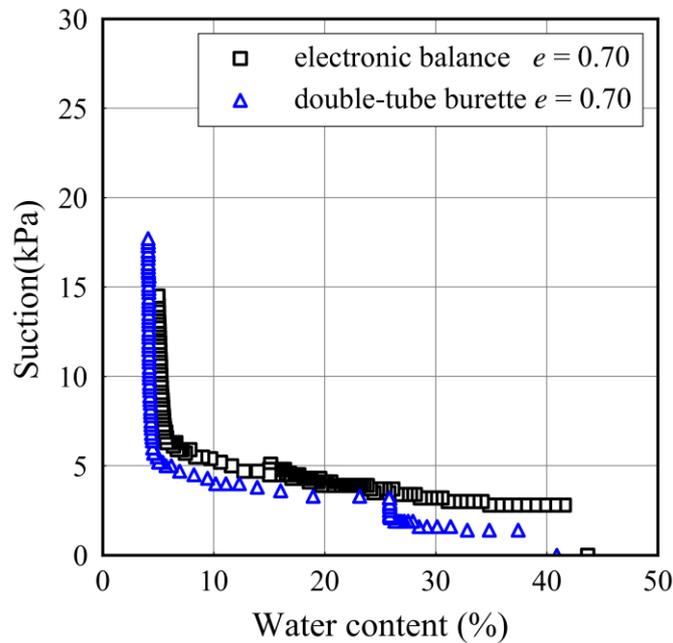


図 5.4.2 水分特性曲線（豊浦砂）

表 5.4.1 平衡状態に達するまでの時間および排水量

	電子天秤		二重管ビュレット	
	55	60	55	60
設定空気圧 [kPa]	55	60	55	60
平衡状態に達するまでの時間 [min]	2126	1401	397	620
排水量 [g]	28.3	38.2	14.9	36.3
含水比 [%]	9.7	3.2	16.6	2.6
体積含水率 [-]	15.0	5.0	25.8	4.1

## 5.5 粒度を調整した試料の保水性試験

### 5.5.1 試料の調整方法

本研究では、前項で用いた東俣シラス-b を粒度調整し、連続加圧型加圧板法の保水性試験を実施した。第 3 章、第 4 章の結果から、細粒分含有率や均等係数がモデルのパラメータと関係があることが明らかとなっていることから、採取試料の東俣シラス-b を細粒分、砂分、礫分に分級して、細粒分含有率を  $F_c=0\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$ 、 $40\%$  に調整した試料を作製した。試料を調整する際に、砂分と礫分の調整割合は採取試料を参考に決定している。図 5.5.1、図 5.5.2 に採取試料と調整試料の粒径加積曲線と三角座標による土質の工学的分類<sup>13)</sup>を示す。また、火山灰質砂質土の粒径加積曲線は、ふるい分析と沈降分析の接続部分で不連続となる場合がある<sup>14)15)</sup>。この理由としては、沈降分析時に粒子内に存在する間隙によって、粒子の沈降速度が低下し懸濁液濃度が見かけ上高くなること、粒子径の違いに伴う土粒子密度の違いによって、粒子の沈降速度に影響を及ぼすことで懸濁液濃度がばらつくことなどが要因として考えられる<sup>15)</sup>。即ち、沈降分析によって細粒分の含有率を過大または過小に評価することが要因である。東俣シラスの採取試料においても、地盤工学会基準<sup>13)</sup>による粒度試験を実施したところ、ふるい分析と沈降分析

の間で不連続な傾向が確認されたため、本試験では荒牧ら<sup>15)</sup>が提案する方法で粒度試験を実施している。表 5.5.1 に採取試料と調整試料の粒度特性値を表に示す。

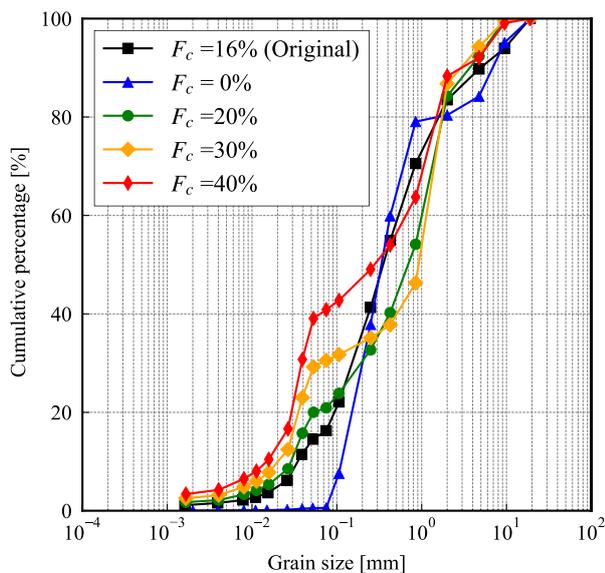


図 5.5.1 粒径加積曲線

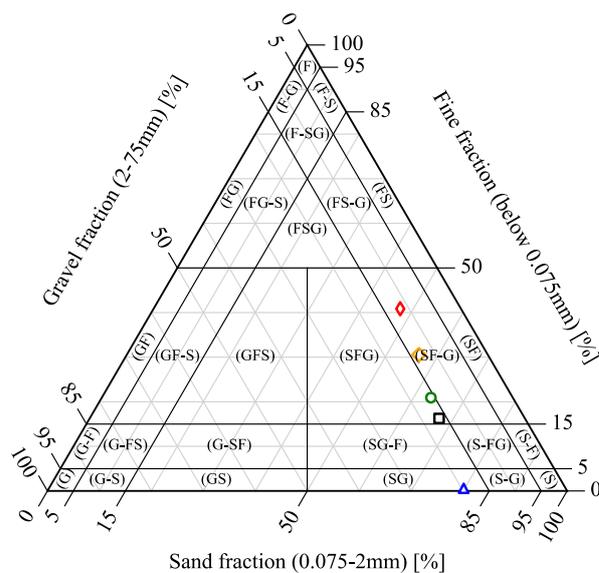


図 5.5.2 三角座標による土質の分類

表 5.5.1 粒度特性値

試料	細粒分含有率 $F_c$ [%]	均等係数 $U_c$
採取試料	16.3	15.0
調整試料 ( $F_c=0\%$ )	0.59	5.57
調整試料 ( $F_c=20\%$ )	20.9	21.4
調整試料 ( $F_c=30\%$ )	30.6	37.2
調整試料 ( $F_c=40\%$ )	40.8	43.3

### 5.5.2 粒度を調整した保水性試験

東俣シラスの採取試料 ( $F_c = 16\%$ ) と粒度調整試料 ( $F_c = 0, 20, 30, 40\%$ ) の 5 試料の保水性試験を実施した。採取試料、と粒度調整試料 ( $F_c = 0, 20, 40\%$ ) は、吸排水機構に電子天秤を用いた試験装置 (図 5.3.10) を用いた、一方、粒度調整試料 ( $F_c = 30\%$ ) は、吸排水機構に二重管ビュレットと差圧計を用いた試験装置 (図 5.4.1) を使用した。試料は初期含水比  $w_0 = 25\%$  で調整し小型のランマーを用いて 1 層につき 30 回、3 層で締固めを行った。供試体作製後に、水浸脱気法<sup>1)</sup>により飽和度を高めた。サクシオン制御はセル圧  $40\text{kPa} \rightarrow 50\text{kPa} \rightarrow 60\text{kPa} \rightarrow 80\text{kPa} \rightarrow 100\text{kPa}$  とし、背圧は  $30\text{kPa}$  で一定とした。供試体底部のセラミック板には CD-2 (表 5.3.1) を使用し、間隙水圧を測定する中央部のセラミック製ポーラスカップには CPC-2 (表 5.3.2) を使用した。前項のように、吸排水機構に電子天秤を用いた試験装置では、排水量の変化量が  $0.01\text{g/hour}$  以下となった時を平衡状態とし、二重管ビュレットと差圧計を用いた試験装置では、差圧計で得られる変化量が  $0.0\text{v/hour}$  となった時を平衡状態と仮定した。試験終了後に、供試体の含水比を測定し、排水量から逆算することで体積含水率  $W_v$  を決定した。水浸脱気時や試験終了後に供試体の高さに変化が無いことが確認されたため、試験中の体積変化は無視することとした。また本試験では、排水過程のみを実施している。

図 5.5.3 に採取試料と調整試料と水分特性曲線の試験結果を示す。保水性試験より、細粒分含有率が多い土質ほど、保水性が高くなる傾向が見られる。 $F_c = 20\%$  の土質の試験では、レギュレータ (調圧装置) の不良により、セル圧が不安定となっていたことから、一部の過程で吸水過程となっている。以降の検討では、主に平衡状態の試験結果と、排水過程でサクシオンが安定した状態の試験値を用いる。

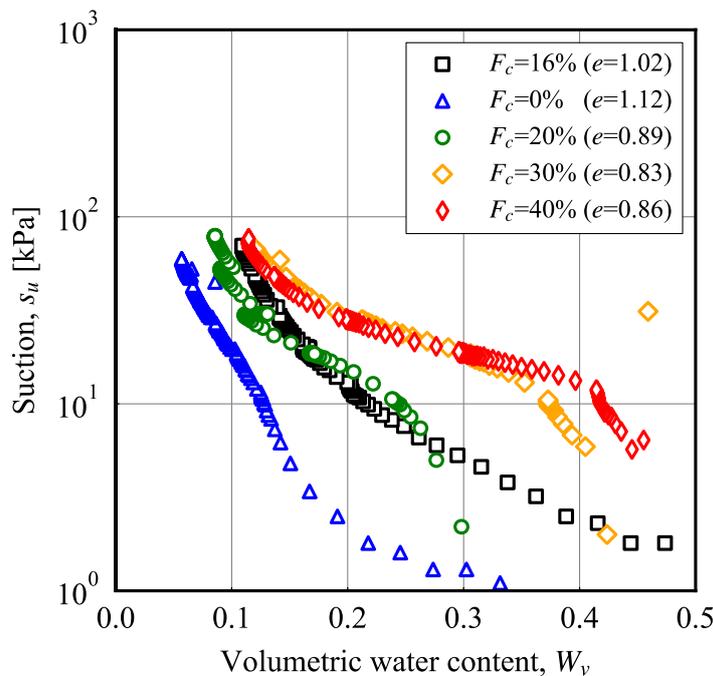


図 5.5.3 保水性試験結果

## 5.6 本章のまとめ

本章では第3章と第4章で提案した間隙径分布の導出手法の評価を行うために、粒度を調整した試料による保水性試験を実施した。加えて、連続加圧型加圧板法の測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良と、試験装置の安定性の向上を目的とした、吸排水の測定機構の改良を行ったため、その改良効果についても述べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 5-1) 連続加圧型加圧板法の間隙水圧の測定位置に関する検討を行った結果、底部から中央部に改良することによって、間隙水圧の時間遅れを軽減することができることが示された。
- 5-2) 供試体の排水部にセラミック板を用いる加圧板法とポーラスストーンと微細多孔質膜を用いる加圧膜法に改良することで、特に排水量の多いサクシオン制御段階で、間隙水圧の時間遅れが改善する傾向が明らかとなった。またこの段階では、平衡状態となる時間も短くなることから、加圧膜法では試験時間の短縮化が期待される。
- 5-3) 吸排水の測定機構を電子天秤から、二重管ビュレットと差圧計に改良することで、試験装置の安定性やメンテナンス性が向上した。吸排水機構の違いに伴う試験結果の比較を行ったところ、本研究で用いた差圧計の精度によって、平衡状態とみなすまでの時間が電子天秤を用いた試験よりも短くなることが明らかとなった。
- 5-4) 東俣シラスの粒度を調整し、保水性試験実施した結果、細粒分含有率が多い土質ほど保水性が高くなる傾向が得られた。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第一回改訂版，二分冊の一，第3編7章土の保水性試験，pp.184-198，2020.
- 2) 畠山正則・京野修・川原孝洋：連続加圧方式による保水性試験装置の開発，応用地質技術年報，No.34，pp.23-54，2015.
- 3) Fredlund, D. G. : Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice, pp.113-114, 2012.
- 4) 山本孝憲，酒匂一成：保水性試験におけるサクション制御後の間隙水圧の変動の観測，平成26年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.465-466，2015.
- 5) 京野修，畠山正則，持田文弘，安福規之，石蔵良平，アデルアロウェイシー：保水性試験における計測データの信頼性，第55回地盤工学研究発表会発表講演集，23-1-4-04，2020.
- 6) 石大地，酒匂一成，伊藤真一，中島亮輔，高田雄大：連続型加圧型加圧板法における間隙水圧の応答に生じる時間遅れに関する一考察，第57回地盤工学研究発表会発表講演集，20-10-4-03，2022.
- 7) 石大地，酒匂一成，伊藤真一，中島亮輔，高田雄大：連続加圧型加圧板法の装置改良効果における土の種類の影響，Kansai Geo-Symposium 2022 論文集，pp.85-90，2022.
- 8) 石大地，酒匂一成，伊藤真一，中島亮輔，高田雄大：加圧板法における供試体サイズ拡大が試験結果に与える影響に関する一考察，第58回地盤工学研究発表会発表講演集，12-4-1-04，2023.
- 9) 中島亮輔，石大地，酒匂一成，伊藤真一，高田雄大：加圧膜法による間隙水圧の時間遅れに関する一考察，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，III-439，2023.
- 10) 西村友良，古関潤一：セルローズ膜を用いた非塑性シルトの水分保持曲線，平成19年度第62回土木学会年次学術講演会，pp.197-197，2007.
- 11) 地盤工学会編：地盤材料試験の方法と解説，第一回改訂版，二分冊の一，pp.465-478，2020.
- 12) 渡部新一：質量：電子天びんの動向，計測と制御，44-10，pp.668-674，2005.
- 13) 地盤工学会編，地盤材料試験の方法と解説，第一回改訂版，二分冊の一，pp.132-144，2020.
- 14) 北村良介，松元真一，鈴木隆文：降下軽石（ぼら）の粒度試験について，自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集，30，pp.87-88，2006.
- 15) 荒牧憲隆，清松潤一，岡林巧，藤井治雄：火山灰質粗粒土の物理試験測定値のばらつきに及ぼす影響因子の検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 9, No. 3, pp. 359-373, 2014.

## 第6章 提案手法の評価

### 6.1 本章の概要

本章では、第5章で得られた粒度の異なる保水性試験結果を用いて、第3章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式と4章で提案した $D_a$  (mm)を用いた $D_{cha}$ の決定手法の評価を行う。また両者の提案手法の適用範囲について議論するとともに、両者の手法の推定精度について明らかにする。

### 6.2 Case1 (第3章)の提案手法の評価

#### 6.2.1 粒度特性値と平行移動指数の導出式の評価

初めに、粒度特性値と平行移動指数の関係から得られた導出式の評価を行う。表5.5.1に示す粒度特性値を導出式(式(3.3.3), 式(3.3.4))に代入することで平行移動指数を得る。また、得られた平行移動指数を式にそれぞれ代入することで、サクシオンに寄与する間隙径分布の平均値が得られるため、間隙径分布が求まる。粒度特性値と平行移動指数の導出式では、 $F_c > 20\%$ ,  $U_c > 20$ の範囲の土質しかないのでこの範囲のみに適用できると考えられるが、本検討では、粒度調整試料( $F_c = 20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$ )に加えて、採取試料( $F_c = 16\%$ )についても検討した。また、連続加圧型加圧板法は平衡状態に至るまでの過程も水分特性曲線の試験結果とみなされる<sup>1)2)</sup>とし、本検討では、平衡状態以外の試験値も計算結果との比較に用いる。また、本モデルでは、水分特性曲線の空気侵入値や残留領域の影響を考慮できていないため、空気侵入値と残留領域の間の推移領域について議論する。

図6.2.1に採取試料( $F_c = 16\%$ ,  $U_c = 15$ )の試験結果と計算結果を示す。元の間隙径分布(式(2.2.6)-式(2.2.8))から得られた計算結果(破線)は水分特性曲線の実験値に対して過小評価されている。細粒分含有率と平行移動指数から得られた導出式より得られた間隙径分布を用いた計算結果(実線)や均等係数と平行移動指数から得られた導出式より得られた(点線)は、試験結果に対して近い計算結果となることが明らかとなった。導出式は、 $F_c < 20\%$ の土質のデータが無い状態で得られたものであるが(図3.3.4),  $F_c = 16\%$ の土質においても近似式を用いることで、適切な平行移動指数を決定することができる可能性が示唆された。

図6.2.2に調整試料( $F_c = 20\%$ ,  $U_c = 21.4$ )の試験結果と計算結果を示す。元の間隙径分布(式(2.2.6)-式(2.2.8))から得られた計算結果(破線)は水分特性曲線の実験値に対して過小評価されている。細粒分含有率と平行移動指数から得られた導出式より得られた間隙径分布を用いた計算結果(実線)や均等係数と平行移動指数から得られた導出式より得られた(点線)は試験結果に対して非常に一致度の高い結果が得られた。

図6.2.3に調整試料( $F_c = 30\%$ ,  $U_c = 37.2$ )の試験結果と計算結果を示す。元の間隙径分布(式(2.2.6)-式(2.2.8))から得られた計算結果(破線)は水分特性曲線の実験値に対して過小評価されている。細粒分含有率と平行移動指数から得られた導出式より得られた間隙径分布を用いた計算結果(実線)や均等係数と平行移動指数から得られた導出式より得られた(点線)においては、高サクシオン域では近い値となっているが、全体的に試験結果に対してやや過小評価する結果となった。これは、図3.3.4や図3.3.5に示すように、 $F_c = 30\%$ ,  $U_c = 37.2$ の範囲の平行移動指数がばらついていることや、近似式を線形で近似していることに起因すると考えられる。このばらつきを抑えるためには、供試体の作製条件や試

験条件をより制御した保水性試験データの蓄積が必要であると考えられる。

図 6.2.4 に調整試料 ( $F_c = 40\%$ ,  $U_c = 43.3$ ) の試験結果と計算結果を示す。元の間隙径分布 (式 (2.2.6)-式 (2.2.8)) から得られた計算結果 (破線) は水分特性曲線の実験値に対して過小評価されている。細粒分含有率と平行移動指数から得られた導出式より得られた間隙径分布を用いた計算結果 (実線) は、試験結果に対して、過小評価されていることがわかる。これは、図 3.3.4 に示すように、 $F_c > 40\%$  の土質の近似式の値が、実際の平行移動指数より過大評価されていることが考えられる。平行移動指数が過大に評価されたことで、間隙径分布が過大に計算され、保水性が小さく算出された。均等係数と平行移動指数から得られた導出式より得られた (点線) においては、試験結果に対してやや過大評価する結果となった。また、試験結果と計算結果の水分特性曲線の勾配が異なる傾向が明らかとなった。この要因としては、計算結果は分散剤を用いた沈降分析から得られた粒度試験結果を用いているが、保水性試験時の試料には分散剤は用いられていないため、細粒分の団粒化が生じている可能性が考えられる。本モデルでは、宇野ら<sup>3)</sup>の研究によって、粒径加積曲線と間隙径分布に相関が見られたことから、間隙径分布は粒径加積曲線を平行移動させたような形状となると仮定している。特に 0.01mm 以下の粒子 (シルト分以下) は団粒化しやすい<sup>4)</sup>と報告されており、細粒分が多い  $F_c = 40\%$  の試料では、団粒化によって粒径加積曲線と間隙径分布の傾きが異なることによって、試験結果と計算結果の水分特性曲線の勾配に違いが生じたと考えられる。また、保水性試験結果から間隙径分布を計算した研究<sup>5)</sup>においては、供試体の飽和度や飽和度が低いと、団粒化が生じ、団粒状態のまま締められることによって間隙構造が変化することが報告されている。今後は、締め時の含水比や飽和度にも留意した試験条件の設定が必要である。

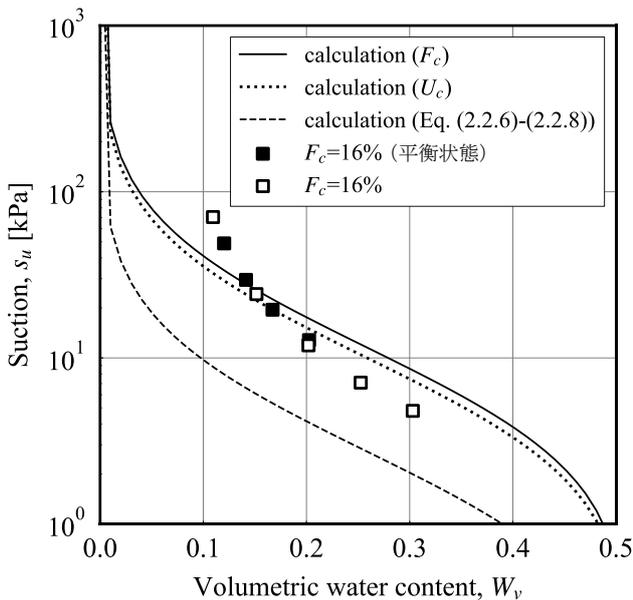


図 6.2.1 採取試料 ( $F_c = 16\%$ ) の試験結果と計算結果

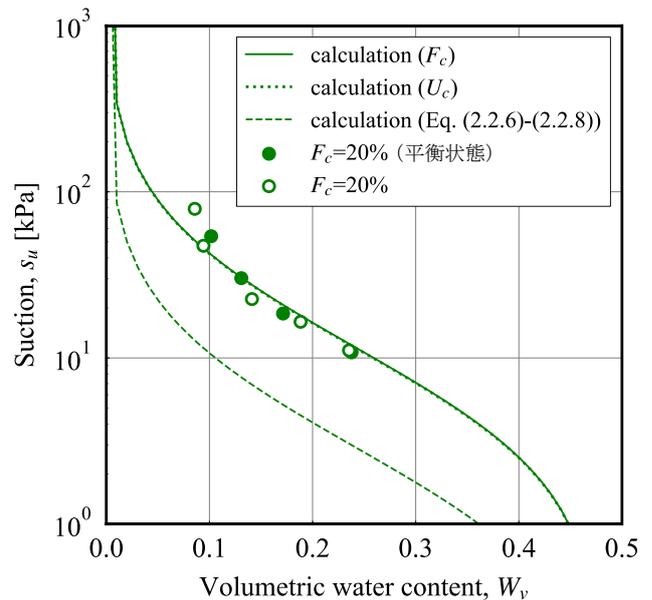


図 6.2.2 調整試料 ( $F_c = 20\%$ ) の試験結果と計算結果

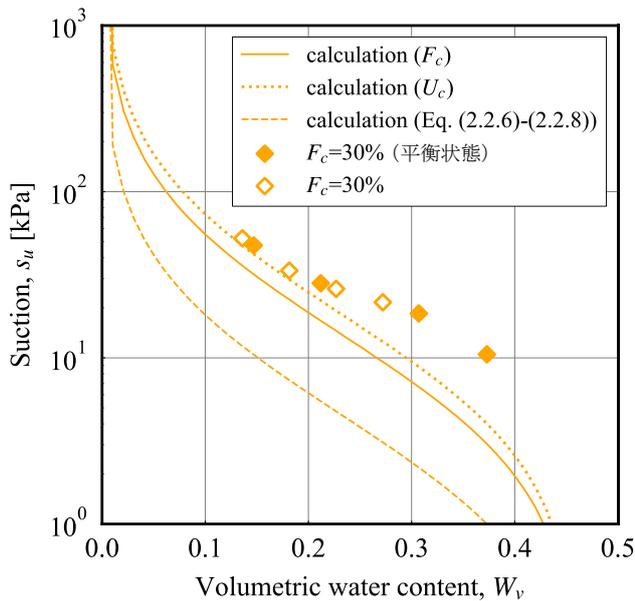


図 6.2.3 調整試料 ( $F_c = 30\%$ ) の試験結果と計算結果

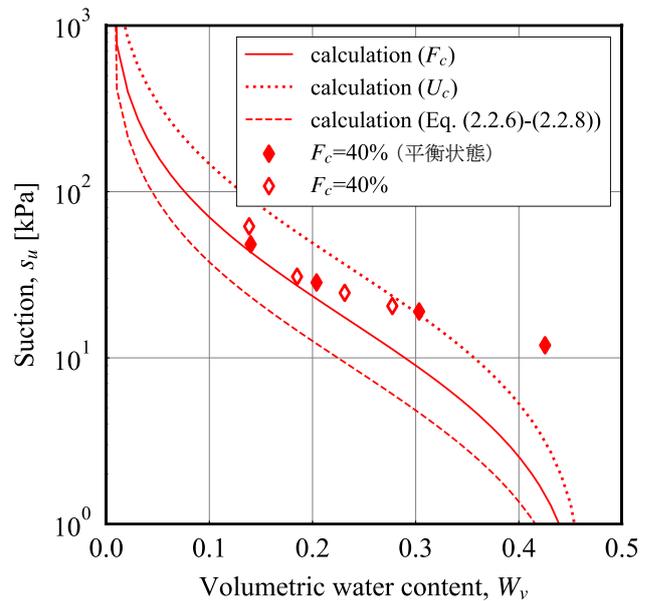


図 6.2.4 調整試料 ( $F_c = 40\%$ ) の試験結果と計算結果

採取試料 ( $F_c = 16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c = 0, 20, 30\%, 40\%$ ) の試験結果に対して、3.2.2 節で述べた方法により、平行移動指数を算出した。図 6.2.5、図 6.2.6 に平行移動指数と粒度特性値の関係を示す。3.2.2 節で述べたように、粒度特性値が増加するとともに、平行移動指数が増加することがわかる。これは、細粒分含有率が多い土質ほど、より多くの間隙水がサクシオンに寄与していることを示唆している。3.2.2 節では、 $F_c > 20\%$ 、 $U_c > 20$  の範囲の土質の平行移動指数の特徴のみ明らかとなっていなかったが、その範囲外  $F_c < 20\%$ 、 $U_c < 20$  においても、粒度特性値の増加とともに、平行移動指数も大きくなる傾向があることが明らかとなった。またこの 5 試料に対する細粒分含有率と平行移動指数の相関係数は  $r = 0.81$ 、均等係数と平行移動指数の相関係数  $r = 0.80$  となり非常に高い値となった。この 5 試料の試験は、間隙比は異なるが供試体の作製条件や試験条件を揃えた試験であり、試験条件を制御することによって、より精度の高い近似式を導出することが可能となることが示唆された。

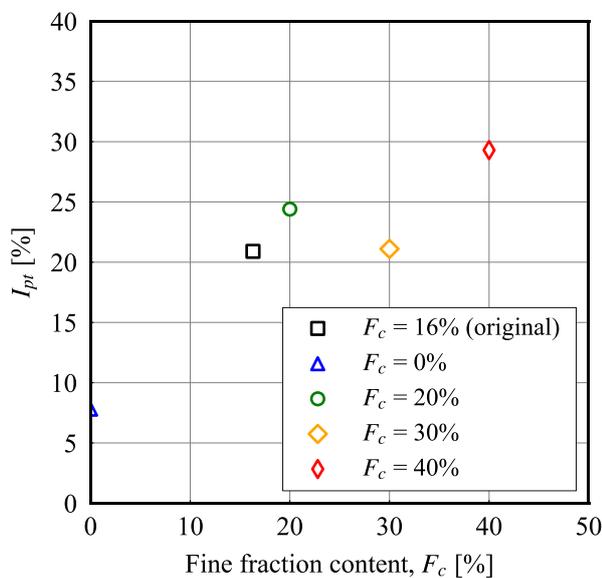


図 6.2.5 細粒分含有率と平行移動指数の関係

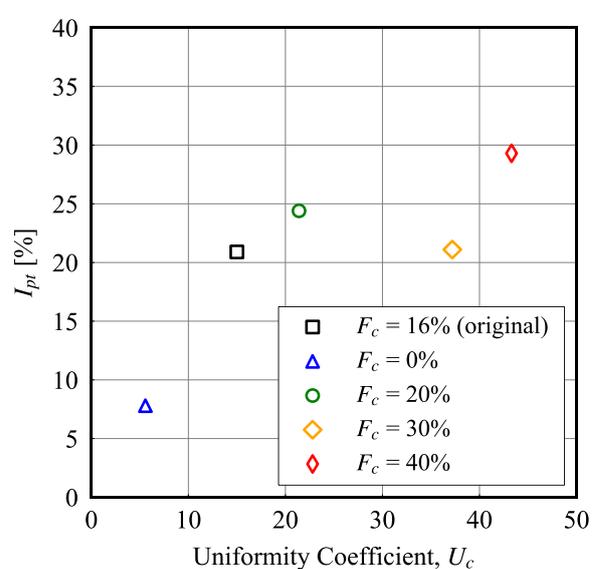


図 6.2.6 均等係数と平行移動指数の関係

## 6.2.2 保水性推定精度の評価

粒度特性値と平行移動指数の導出式から得られた水分特性曲線の推定精度について検討する。採取試料 ( $F_c=16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c=20, 30\%, 40\%$ ) の試験結果の体積含水率と粒度特性値（細粒分含有率, 均等係数）からそれぞれ得られた、試験結果のサクションに対応する体積含水率の計算結果を比較した。

図 6.2.7 に、採取試料 ( $F_c=16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c=20, 30\%, 40\%$ ) の試験結果の体積含水率と計算結果の体積含水率を示す。図に示すように、あるサクションに対する体積含水率の推定精度は全ての試験結果において  $W_v \pm 0.1$  の範囲となることが明らかとなった。また、図 6.2.8 に試料の粒度ごとの試験結果の体積含水率と計算結果の体積含水率を示す。特に、採取試料 ( $F_c=16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c=20$ ) の試験結果に対しては、あるサクションに対する体積含水率の推定精度  $W_v \pm 0.05$  となることが明らかとなった。

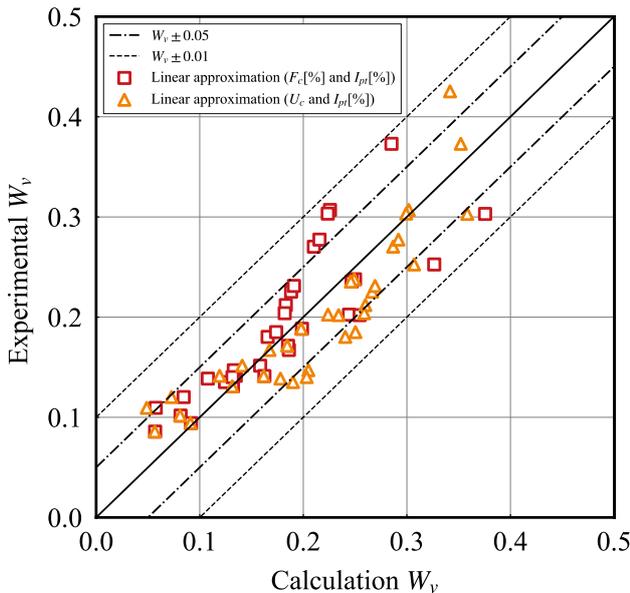


図 6.2.7 全試料における試験結果と計算結果の体積含水率

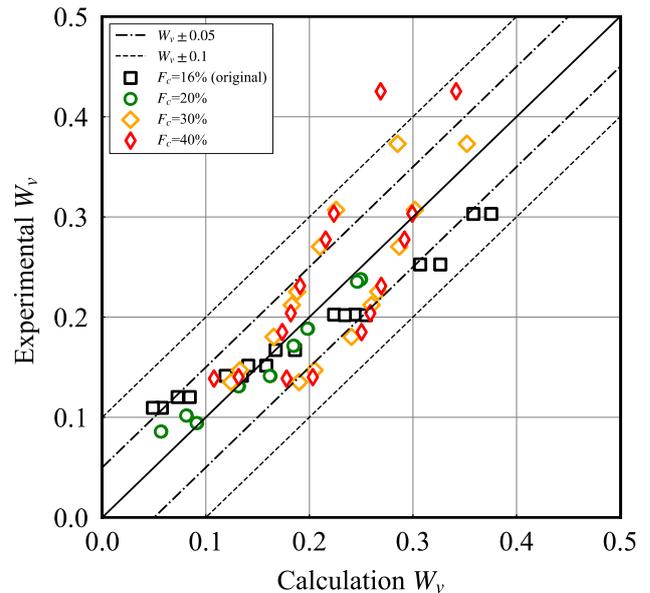


図 6.2.8 粒度ごとの試験結果と計算結果の体積含水率

## 6.3 Case2 (4章) の提案手法の評価

### 6.3.1 最適な $D_{cha}$ を決定する手法の評価

本項では、4章で提案する最適な  $D_{cha}$  を決定する方法の評価を行う。特に  $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対して、式(4.4.3)中の  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_\alpha$  は  $10^{-4} < D_\alpha$  (mm)  $< 10^{-3}$  となる傾向にあることが明らかとなったことから、 $D_\alpha=10^{-4}$  mm,  $10^{-3}$  mm,  $2.6 \times 10^{-4}$  mm (幾何平均値) に設定した際の  $D_{cha}$  を算出し、算出された  $D_{cha}$  を基に、サクションに寄与する間隙径分布を算出する。得られた間隙径分布から水分特性曲線を推定する。 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の範囲の調整試料 ( $F_c=30\%, 40\%$ ) に対して検討を行う。

図 6.3.1 に調整試料 ( $F_c=30\%, U_c=37.2$ ) の水分特性曲線の試験結果と計算結果を示す。また、表 6.3.1 に  $D_\alpha=10^{-4}$  mm,  $10^{-3}$  mm,  $2.6 \times 10^{-4}$  mm (幾何平均値) に設定に設定した際の  $D_{cha}$  を示す。また、表 6.3.2 に4.4節に示す方法によって、保水性試験結果より逆算された間隙径分布から得られた最適な  $D_\alpha$ ,

$D_{cha}$ を示す。 $D_a=10^{-4}$  mmに設定した際の $D_{cha}$ は $D_{1.04}$ となり、間隙径分布が過小評価されたことから、計算結果（実線）は試験結果に比べて過大に評価されている。その一方で、 $D_a=10^{-3}$  mmに設定した際の $D_{cha}$ は、 $D_{4.15}$ となり、間隙径分布が過大に評価されたことにより、計算結果（破線）は試験結果に比べて過小評価されていることがわかる。試験結果は、 $D_a=10^{-4}$  mm、 $10^{-3}$  mmの計算結果の範囲に収まっており、 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ の範囲で $D_a$ を設定することで、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出するための $D_{cha}$ を決定できる可能性が示された。図 6.3.1には4.4節の結果から得られた $D_a$ の幾何平均値（ $=2.6 \times 10^{-4}$  mm）に設定したときの計算結果も示しているが、 $D_a=2.6 \times 10^{-4}$  mm（幾何平均値）のときに、 $D_{cha}$ は、 $D_{1.80}$ となり保水性試験結果に近い計算結果となっている。また、保水性試験結果から逆算された最適な $D_a$ は $2.44 \times 10^{-4}$  mmとなり、 $D_{cha}$ は、 $D_{1.74}$ となり幾何平均値から算出される値と近いことが明らかとなった。

図 6.3.2に $F_c = 40\%$ の水分特性曲線の試験結果と計算結果を示す。 $F_c = 30\%$ の試験結果と同様に、 $D_a=10^{-4}$  mmに設定した際の $D_{cha}$ は $D_{1.72}$ となり、計算結果（実線）は試験結果に比べて過大に評価され、 $D_a=10^{-3}$  mmに設定した際の $D_{cha}$ は、 $D_{6.78}$ となり、計算結果（破線）は試験結果に比べて過小評価されていることがわかる。 $F_c=40\%$ の試料においても、試験結果は $D_a=10^{-4}$  mm、 $10^{-3}$  mmに設定したときの $D_{cha}$ を用いた計算結果の範囲に収まっており、 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ の範囲で $D_a$ を設定することで、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出するための $D_{cha}$ を決定できる可能性が示された。図 6.3.2に $D_a$ の幾何平均値（ $=2.6 \times 10^{-4}$  mm）に設定したときの計算結果も示しているが、 $D_a=2.6 \times 10^{-4}$  mm（幾何平均値）のときに、 $D_{cha}$ は、 $D_{3.13}$ となり、前述のように、水分特性曲線の勾配が異なっているものの、保水性試験結果の傾向を反映した計算結果となっている。また、保水性試験結果から逆算された最適な $D_a$ は $2.58 \times 10^{-4}$  mmとなり、 $D_{cha}$ は、 $D_{3.02}$ となり幾何平均値から算出される値と近いことが明らかとなった。

採取試料（ $F_c=16\%$ ）、粒度調整試料（ $F_c=0, 20, 30\%, 40\%$ ）の試験結果に対して、4.4節で述べた方法により、最適な $D_a$ と $D_{cha}$ を計算した。図 6.3.3、図 6.3.4に粒度特性値と $D_a$ の関係を示す。4.4節で述べたように、粒度特性値が増加するとともに、 $D_a$ の値はやや減少する傾向にみられる。また、 $F_c > 10\%$ かつ、 $U_c < 25$ の土質に対しては、 $D_a$ は $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ となり、それ以外の範囲の細粒分含有率や均等係数が小さい土質では、 $D_a > 10^{-3}$  mmとなる傾向があることが明らかとなった。

図 6.3.5、図 6.3.6には、粒度特性値と $D_{cha}$  (%)の関係を示しているが、ばらつきが大きく、 $D_{cha}$  (%)と粒度特性値の関係性は低いことが明らかとなった。

以上の結果より、式(4.4.3)中の $D_{cha}$ の計算に用いる最小粒径 $D_a$ は、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$ の土質に対して、 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ の範囲となり、水分特性曲線の試験結果は、 $D_a=10^{-4}$  mm、 $10^{-3}$  mmに設定したときの $D_{cha}$ を用いた計算結果の範囲に収まる。また、 $D_a$ の幾何平均値（ $=2.6 \times 10^{-4}$  mm）に設定した際に試験結果に近い結果が得られる。

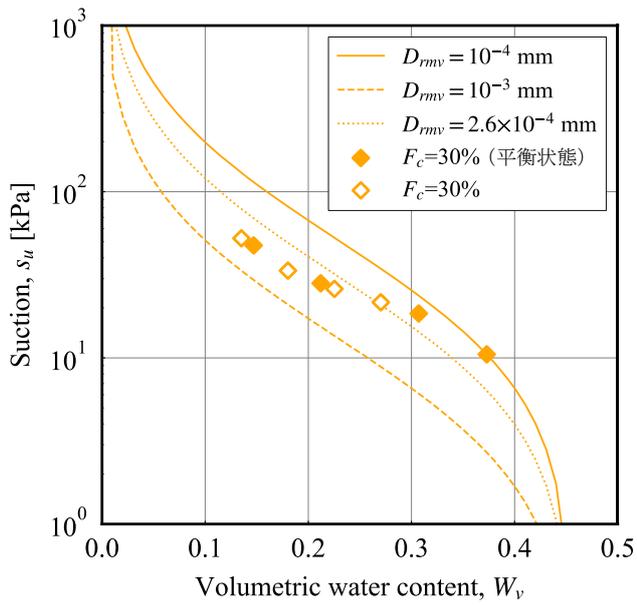


図 6.3.1 調整試料 ( $F_c = 30\%$ ) の試験結果と計算結果

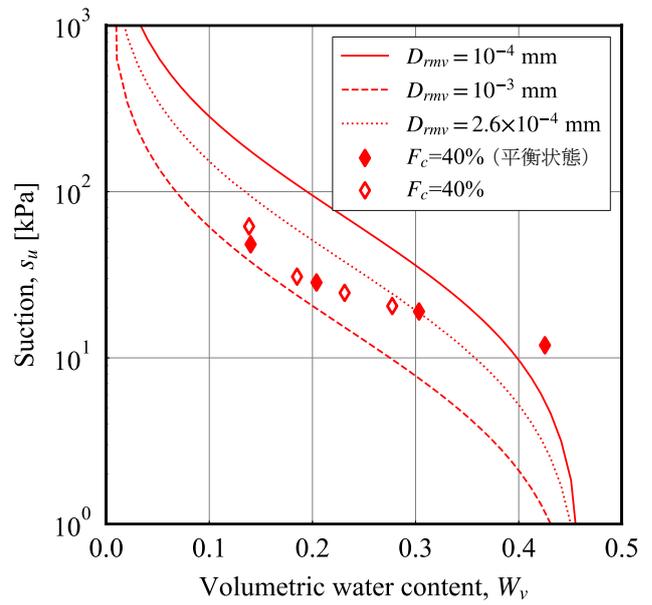


図 6.3.2 調整試料 ( $F_c = 40\%$ ) の試験結果と計算結果

表 6.3.1 調整試料 ( $F_c = 30\%$ ,  $40\%$ ) の  $D_\alpha$  と  $D_{cha}$

$F_c = 30\%$		$F_c = 40\%$	
$D_\alpha$ [mm]	$D_{cha}$ [%]	$D_\alpha$ [mm]	$D_{cha}$ [%]
$10^{-4}$	$D_{1.04}$	$10^{-4}$	$D_{1.72}$
$10^{-3}$	$D_{4.15}$	$10^{-3}$	$D_{6.78}$
$2.6 \times 10^{-4}$	$D_{1.80}$	$2.6 \times 10^{-4}$	$D_{3.13}$

表 6.3.2 調整試料 ( $F_c = 30\%$ ,  $40\%$ ) の最適な  $D_\alpha$  から求まる  $D_{cha}$

$F_c = 30\%$		$F_c = 40\%$	
$D_\alpha$ [mm]	$D_{cha}$ [%]	$D_\alpha$ [mm]	$D_{cha}$ [%]
$2.44 \times 10^{-4}$	$D_{1.74}$	$2.58 \times 10^{-4}$	$D_{3.02}$

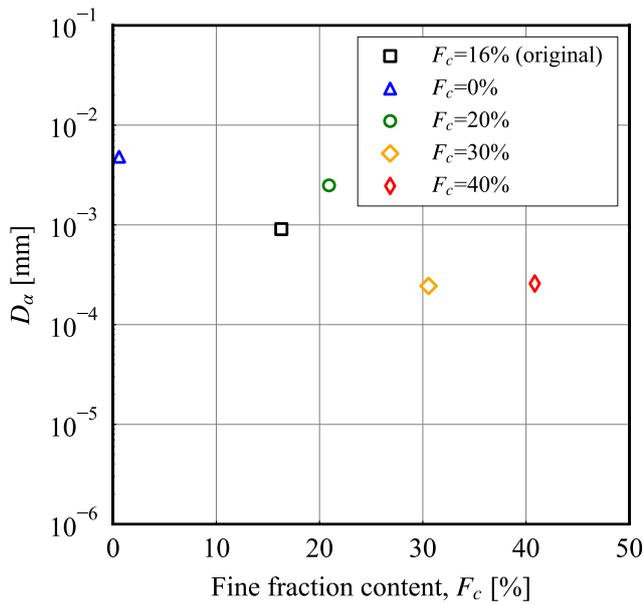


図 6.3.3 細粒分含有率と  $D_\alpha$  の関係

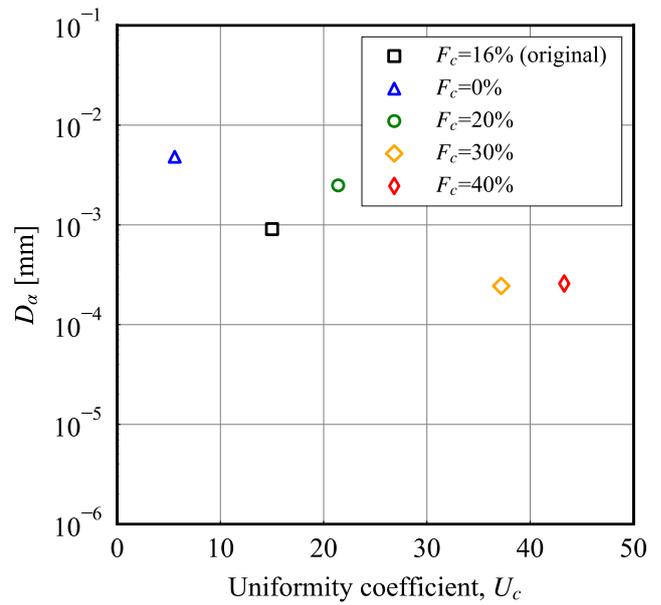


図 6.3.4 均等係数と  $D_\alpha$  の関係

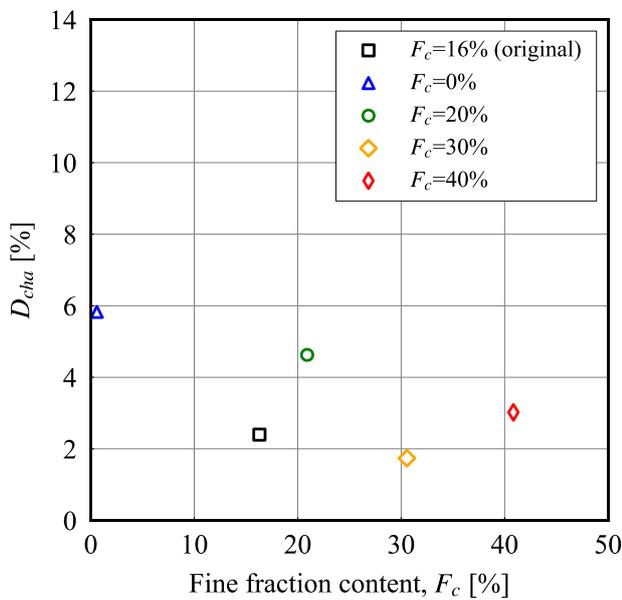


図 6.3.5 細粒分含有率と  $D_{cha}$  の関係

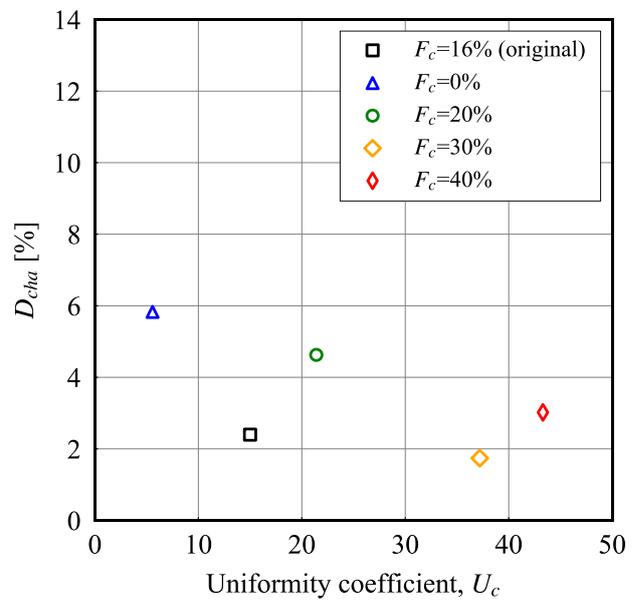


図 6.3.6 均等係数と  $D_{cha}$  の関係

### 6.3.2 保水性推定精度に関する評価

本節では、 $D_\alpha = 10^{-3} \text{ mm}$ ,  $10^{-4} \text{ mm}$ ,  $2.6 \times 10^{-4} \text{ mm}$  (幾何平均値) をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  を用いて間隙径分布を導出し、水分特性曲線を推定した際の推定精度について検討する。ここでは、調整試料 ( $F_c = 30\%$ ,  $40\%$ ) の計算結果を用いた。図 6.3.7, 図 6.3.8 にそれぞれの試料の実験値の体積含水率と、サクシヨンの実験値に対する各計算結果の体積含水率を示す。 $F_c = 30\%$  の試料の保水性推定精度に着目すると、 $10^{-4} < D_\alpha \text{ (mm)} < 10^{-3}$  の範囲で  $D_\alpha$  を設定したときのあるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  となることがわかる。また、 $D_\alpha$  の幾何平均値 ( $D_\alpha = 2.6 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ) に設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線の、あるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.05$  となることが示された。また、 $F_c = 40\%$  の試料の保水性推定精度に着目すると、同様に  $10^{-4} < D_\alpha \text{ (mm)} < 10^{-3}$  の範囲で  $D_\alpha$  を設定したときのあるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  と

なることが明らかとなった。

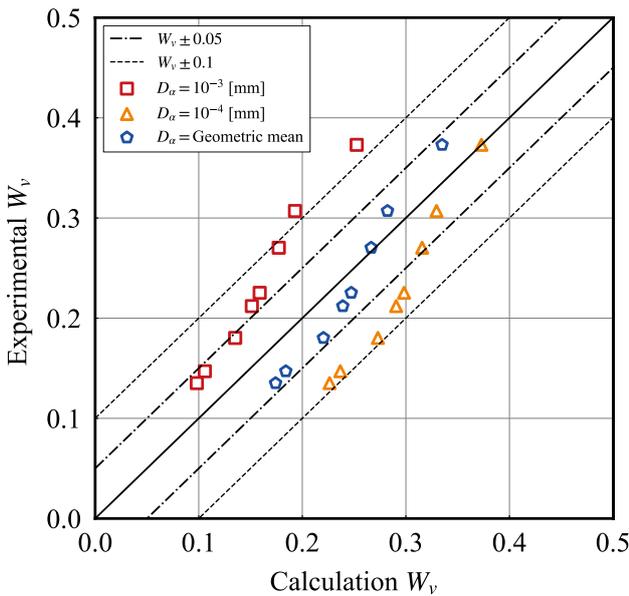


図 6.3.7 試験結果と計算結果の体積含水率 ( $F_c = 30\%$ )

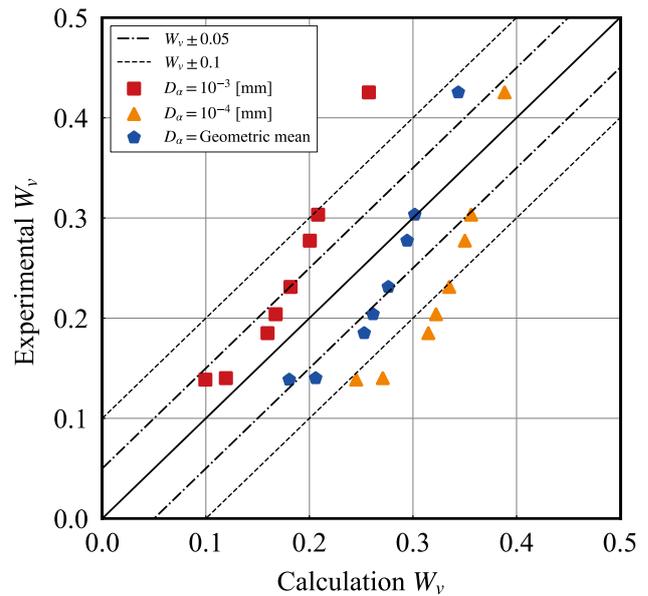


図 6.3.8 試験結果と計算結果の体積含水率 ( $F_c = 40\%$ )

#### 6.4 本章のまとめ

本章では、第 5 章で得られた粒度の異なる保水性試験結果を用いて、第 3 章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式と第 4 章で提案した  $D_a$  (mm) を用いた  $D_{cha}$  の決定手法について議論した。また両者の提案手法の適用範囲について議論するとともに、両者の手法の推定精度について明らかにした。本章で得られた知見を以下にまとめる。

6-1) 第 3 章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式の評価を行った結果、採取試料 ( $F_c = 16\%$ )、調整試料 ( $F_c = 20\%$ ) に対しては、導出式から得られた平行移動指数を用いることで試験結果に近い水分特性曲線の推定することが可能であることが明らかとなった。また、供試体の作製条件や試験条件を揃えることで、導出式の精度が向上する可能性が示唆された。

6-2) 調整試料 ( $F_c = 30\%$ ,  $40\%$ ) に対しては、試験結果と計算結果が異なる傾向明らかとなった。特に、 $F_c = 40\%$  の試料では試験結果と計算結果の水分特性曲線の勾配が異なることが示された、この要因としては近似式を導出する際に、 $F_c = 40\%$  保水性試験結果が少ないことや、保水性試験時に細粒分が団粒化していることなどが考えられた。

6-3) 粒度特性値と平行移動指数の導出式から得られた計算結果のあるサクションに対する体積含水率の推定精度は、全ての試料の試験結果に対して  $W_v \pm 0.1$  の範囲となり、特に採取試料 ( $F_c = 16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c = 20\%$ ) の試験結果に対しては、およそ  $W_v \pm 0.05$  となることが明らかとなった。

6-4) 4 章で提案した  $D_a$  (mm) を用いた  $D_{cha}$  の決定手法の評価を行った結果、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c <$

100 の土質に対して、試験結果は、 $D_a=10^{-4}$  mm,  $10^{-3}$  mm の計算結果の範囲に収まっており、 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$  の範囲で  $D_a$  を設定することで、サクシヨンに寄与する間隙径分布を導出するための  $D_{cha}$  を決定できる可能性が示された。また、 $D_a$  の幾何平均値 (=  $2.6 \times 10^{-4}$  mm) から  $D_{cha}$  を決定することで、試験結果に近い水分特性曲線を得られること明らかとなった。

6-5)  $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$  の範囲で  $D_a$  を設定したときのあるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  となり、 $F_c = 30\%$  の土質に対しては、 $D_a$  の幾何平均 ( $D_a = 2.6 \times 10^{-4}$  mm) に設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線の、あるサクシヨンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.05$  となることが示された。

#### 参考文献

- 1) 畠山正則・京野修・川原孝洋：連続加圧方式による保水性試験装置の開発，応用地質技術年報，No.34，pp.23-54，2015.
- 2) 石大地，酒匂一成，伊藤真一，中島亮輔，高田雄大：連続加圧型加圧板法の装置改良効果における土の種類の影響，Kansai Geo-Symposium 2022 論文集，pp.85-90，2022.
- 3) 宇野尚雄，神谷浩二，田中宏路：「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布，土木学会論文集，No.603，Ⅲ-44，pp.35-44，1998.
- 4) 杉井俊夫，山田公夫，方方，馬貴臣：団粒化した土の物性と舗装技術への適用，中部大学総合工学研究所紀要，Vol.25，pp.39-46，2013.
- 5) 杉井俊夫，野川敦史，古川泰之：締固め時の含水比が透水係数に及ぼす間隙構造，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会，Ⅲ-247，2023.

## 第7章 結論

### 7.1 本論文のまとめ

本論文では、間隙モデルの保水性推定精度向上を目的として、モデルの間隙径分布の導出方法を改良した。また、その改良効果や推定精度について保水性試験を実施することで評価した。本論文のまとめを以下に示す。

第1章では、本研究の背景や目的を明確にするとともに、本論文の構成を示した。

第2章では、本研究で対象としている間隙モデルの概要と計算過程を示した。

第3章では、土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出方法について述べた。まず、Sako and Kitamura (2006)によって提案された、保水性試験結果から算出される間隙径分布の逆算値と、その逆算値から得られるサクシオンに寄与する間隙径分布の導出方法について整理した。また、元の間隙径分布とサクシオンに寄与する間隙径分布から得られる平行移動指数と、粒度特性値との関係性について再検討し、粒度特性値から平行移動指数を算出するための導出式を提案した。加えて、各サクシオンにおけるサクシオンに寄与する間隙水の割合を寄与率として提案し、各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について考察した。その結果以下が得られた。

- 3-1) 火山灰質砂質土 30 試料と砂質土 24 試料に対して平行移動指数を算出し、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）との関係性について検討した結果、ばらつきが大きいことが明らかとなった。その要因としては、試験方法の違いや試験条件の違いが考えられる。
- 3-2) 加圧板法と水頭法で得られたサクシオンの条件が等しい火山灰質砂質土 24 試料に対して検討した結果、細粒分含有率や均等係数が大きい土質は平行移動指数も大きくなる傾向があることが明らかとなった。これは、細かい粒子が多い土質ほど、多くの間隙水が寄与していることを示唆している。また、その関係から線形回帰による導出式を提案した。
- 3-3) 導出式を用いた平行移動指数から水分特性曲線を推定し、保水性推定精度について検討した結果、実験値の体積含水率  $W_v \pm 0.1$  の範囲となることが明らかとなった。
- 3-4) 各サクシオンにおける寄与率を提案した結果、低サクシオン域（高飽和度域）でサクシオンに寄与する間隙水が多いこと、細粒分含有率が多い土質ほど、各サクシオンにおける寄与率も大きくなる傾向にあることが明らかとなった。また、細粒分含有率と寄与率には強い相関があることが明らかとなった。

第4章では、モデルの素体積高さ  $D_{cha}$  に着目した間隙径分布の導出方法について述べた。素体積高さ  $D_{cha}$  はその土を代表する粒径粒径（代表粒径、特徴粒径）と定義されており、間隙径分布の導出に関するパラメータである。従来の間隙モデルでは、 $D_{10}$ （10%通過粒径）が透水係数に影響を及ぼす粒径であることが知られていることから、 $D_{cha} = D_{10}$  と固定してきた。しかし、間隙径分布に関する代表粒径が土質ごとに存在すると考えられたため、サクシオンに寄与する間隙径分布に関する代表粒径を土質ごとに決定することを目的とした。サクシオンに寄与する間隙径分布に関する素体積高さ  $D_{cha}$  を土質ごとに決定するための導出式を提案し、シラスを含む砂質土と砂質土の保水性試験結果から  $D_{cha}$  を算出

した。  $D_{cha}$  と式中のパラメータと粒度特性値との関係について検討し、最終的に粒度特性値から  $D_{cha}$  を求めることにより、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出する方法を提案した。加えて、提案手法の適用範囲や保水性推定精度について議論した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 4-1) 粒度加積曲線の確率密度関数を用いた素体積高さ  $D_{cha}$  の導出式を提案した結果、細粒分の個数の影響を過大に評価する傾向にあり、 $D_{cha}$  のサイズが過小評価される。それによって、間隙径分布は過小評価されるため、水分特性曲線の計算結果は試験結果に対して過大に評価される傾向がある。
- 4-2) Kitamura and Sako (2020)による改良式の評価を行った結果、式中の  $D_{cha}$  の計算に用いる最小粒径  $D_{\alpha}$  ( $\alpha=10$ ,  $D_{10}$  未満の粒径の影響を取り除く)、とする計算結果は、 $D_{cha}$  のサイズを過大に評価するため、水分特性曲線は試験結果に対して過小評価される傾向にあることが明らかとなった。
- 4-3) 最小粒径  $D_{\alpha}$  を調節しながら  $D_{cha}$  のサイズを保水性試験結果から逆算された間隙径分布（サクシオンに寄与する間隙径分布）に一致させるようにすることで、最適な  $D_{cha}$  を決定する方法を提案した。また、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）と最小粒径  $D_{\alpha}$ ,  $D_{cha}$  との関係性について検討した結果、特に  $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対して、 $10^{-4} < D_{\alpha}$  (mm)  $< 10^{-3}$  となる傾向にあることが明らかとなった。
- 4-4)  $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$  の土質に対して  $D_{\alpha} = 10^{-3}$  mm,  $10^{-4}$  mm をそれぞれ代入したときの  $D_{cha}$  を用いて間隙径分布を導出し、水分特性曲線を推定した際の推定精度について検討した。その結果、 $D_{\alpha} = 10^{-4}$  mm と設定したときの  $D_{cha}$  から得られた水分特性曲線は、実験値に対して近い傾向となり、あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  となる。また、 $D_{\alpha}$  を幾何平均値 ( $D_{\alpha} = 2.6 \times 10^{-4}$  mm) とするとき、その精度は  $W_v \pm 0.05$  となることが明らかとなった。

第5章では、第3章と第4章で提案した間隙径分布の導出手法の評価を行うために、連続加圧型加圧板法による保水性試験を実施した。東俣シラスの粒度を調整した試料に対して同条件で保水性試験を行うことで、粒度の異なる水分特性曲線を得た。加えて、連続加圧型加圧板法の測定精度の向上と試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良と、試験装置の安定性の向上を目的とした、吸排水の測定機構の改良を行ったため、その改良効果についても述べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 5-1) 連続加圧型加圧板法の間隙水圧の測定位置に関する検討を行った結果、底部から中央部に改良することによって、間隙水圧の時間遅れを軽減することができることが示された。
- 5-2) 供試体の排水部にセラミック板を用いる加圧板法とポーラスストーンと微細多孔質膜を用いる加圧膜法に改良することで、特に排水量の多いサクシオン制御段階で、間隙水圧の時間遅れが改善する傾向が明らかとなった。またこの段階では、平衡状態となる時間も短くなることから、加圧膜法では試験時間の短縮化が期待される。
- 5-3) 吸排水の測定機構を電子天秤から、二重管ビュレットと差圧計に改良することで、試験装置の安定性やメンテナンス性が向上した。吸排水機構の違いに伴う試験結果の比較を行ったところ、本研究で用いた差圧計の精度によって、平衡状態とみなすまでの時間が電子天秤を用いた試験よりも短くなることが明らかとなった。
- 5-4) 東俣シラスの粒度を調整し、保水性試験実施した結果、細粒分含有率が多い土質ほど保水性が高くなる傾向が得られた。

6章では、5章で得られた粒度の異なる保水性試験結果を用いて、3章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式と4章で提案した $D_a$  (mm)を用いた $D_{cha}$ の決定手法について議論した。また両者の提案手法の適用範囲について議論するとともに、両者の手法の推定精度について明らかにした。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 6-1) 3章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式の評価を行った結果、採取試料 ( $F_c=16\%$ )、調整試料 ( $F_c=20\%$ ) に対しては、導出式から得られた平行移動指数を用いることで試験結果に近い水分特性曲線の推定することが可能であることが明らかとなった。また、供試体の作製条件や試験条件を揃えることで、導出式の精度が向上する可能性が示唆された。
- 6-2) 調整試料 ( $F_c=30\%, 40\%$ ) に対しては、試験結果と計算結果が異なる傾向明らかとなった。特に、 $F_c=40\%$ の試料では試験結果と計算結果の水分特性曲線の勾配が異なることが示された、この要因としては近似式を導出する際に、 $F_c=40\%$ 保水性試験結果が少ないことや、保水性試験時に細粒分が団粒化していることなどが考えられた。
- 6-3) 粒度特性値と平行移動指数の導出式から得られた計算結果のあるサクシオンに対する体積含水率の推定精度は、全ての試料の試験結果に対して  $W_v \pm 0.1$  の範囲となり、特に採取試料 ( $F_c=16\%$ )、粒度調整試料 ( $F_c=20$ ) の試験結果に対しては、およそ  $W_v \pm 0.05$  となることが明らかとなった。
- 6-4) 4章で提案した $D_a$  (mm)を用いた $D_{cha}$ の決定手法の評価を行った結果、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$ の土質に対して、試験結果は、 $D_a=10^{-4}$  mm,  $10^{-3}$  mmの計算結果の範囲に収まっており、 $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ の範囲で $D_a$ を設定することで、サクシオンに寄与する間隙径分布を導出するための $D_{cha}$ を決定できる可能性が示された。また、 $D_a$ の幾何平均値 ( $= 2.6 \times 10^{-4}$  mm) から $D_{cha}$ を決定することで、試験結果に近い水分特性曲線を得られること明らかとなった。
- 6-5)  $10^{-4} < D_a$  (mm)  $< 10^{-3}$ の範囲で $D_a$ を設定したときのあるサクシオンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.1$  となり、 $F_c=30\%$ の土質に対しては、 $D_a$ の幾何平均 ( $D_a=2.6 \times 10^{-4}$  mm) に設定したときの $D_{cha}$ から得られた水分特性曲線の、あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度はおよそ  $W_v \pm 0.05$  となることが示された。

## 7.2 今後の展望

今後の展望としては、まず条件を揃えた保水性試験結果の蓄積や、火山灰質砂質土以外の土質のデータの蓄積が挙げられる。3章、4章では、粒度特性値とモデルパラメータとの関係を考察し、粒度特性値からそれらを推定する手法について検討したが、試験条件や試験方法が異なる保水性試験のデータを使用したためばらつきが大きいことが課題となった。また、5章で実施した保水性試験では、供試体作製条件や試験条件を揃えた試験を実施したが、間隙比の違いを考慮できていないため、間隙比を一致させた条件で試験を実施する必要があると考える。火山灰を含まない土質に対しては、本検討では考察できなかったため、より幅広い土質に対して検討するためには、火山灰質砂質土以外の土質のデータの蓄積も必要があると考えられる。

次に、不攪乱試料に対する検討である。本検討で用いた試験結果はすべて攪乱試料に対するものである。攪乱試料と不攪乱試料では保水性や透水性が異なると言われており、実際の地盤の浸透特性を解析に反映させるためには、不攪乱試料におけるデータの蓄積も重要となる。第5章で改良した保水性試験装置を用いることで、不攪乱試料をサンプリングし、保水性試験を実施することが可能となる。

また、本検討では透水性については検討することができなかった。透水係数に対しても 3 章で提案する、平行移動指数や寄与率に関する検討や、5 章で提案する、 $D_{cha}$ を土質ごとに決定する手法の検討を行うことで、土質の基礎的なパラメータから試験結果に近い、水分特性曲線や不飽和透水係数が算出されることが考えられる。これにより、土構造物の設計や維持管理や、斜面崩壊の予測に対する飽和不飽和浸透流解析の高度化や、解析時のパラメータの決定が容易になることが期待される。

## 謝辞

本論文は鹿児島大学理工学研究科博士前期課程の2年間と博士後期課程3年間、約5年間の研究成果をまとめたものです。本論文を作成するにあたり、多くの方々からのお力添えを賜りました。

鹿児島大学学術研究院教授の酒匂一成先生には、学部4年生のときから修士2年間、博士3年間にわたり、終始懇切丁寧な指導とご鞭撻を頂きました。日々の研究に対するご指導や、ゼミでのご指摘のおかげで、研究が円滑に進められ本論文を作成することができました。研究室以外の活動においても、先生のご指導やご支援のもと国内学会や国際学会に参加する機会を与えてくださり、多くの貴重な経験をさせていただきました。また、先生の学生を指導する姿勢や考え方は私にとっての目標であり、大変勉強になりました。ここに酒匂先生のご指導に対し深く感謝の意を表します。

鹿児島大学学術研究院教授の山口明伸先生、同准教授の齋田倫範先生には本研究の副査をお引き受け頂き、研究の進捗発表や予備審査において、研究を遂行する上で重要なアドバイスや、ご指導いただきました。度重なる発表の準備不足があったにもかかわらず、的確なご指導やお声掛けいただき、大変参考になりました。ここに深く、感謝の意を表します。

鹿児島大学名誉教授の北村良介先生には、研究室に来られた際に、研究の進捗を気にかけてくださり本研究に関するアドバイスを頂きました。また、地盤工学会九州支部主催の土の勉強会では、不飽和土質力学について勉強させていただきました。ここに深く、感謝の意を表します。

立命館大学理工学部講師（元鹿児島大学学術研究院助教）伊藤真一先生には、本研究に対するアドバイスや発表資料の作成、プレゼンテーションについてたくさんのご指導いただきました。立命館大学に移動された後も学会等で定期的にお声掛けいただき、大変励みになりました。ここに深く、感謝の意を表します。

鹿児島大学大学院理工学研究科技術部の種田哲也氏、坂元貴之氏には、試験装置の作製や加工をサポートしていただきました。時には、無理なお願いもあったと思いますが、種田氏、坂元氏のおかげで試験装置を改良し、精度の高い実験をすることができました。ここに感謝の意を表します。

酒匂研究室の皆様には、研究室活動のサポートをしていただきました。特に、博士後期課程を共にした昌本拓也氏、軸屋雄太氏には研究活動のみならず、学生生活もサポートしていただきました。3人で研究についての深い議論や、将来についての話をしたことは、私にとって貴重な経験となりました。ここに深く感謝の意を表します。

(株)東亜建設の石大地氏、日本工営(株)の高田雄大氏には、第5章の試験装置の改良や試験の実施のフォローをしていただきました。本論文の第5章は2人の協力なしでは、まとめることはできませんでした。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、学部から博士後期課程の合計9年間を私生活面から支え、見守り続けてくださる両親に深く感謝します。

皆様の今後のますますのご活躍と、ご健闘を祈りまして謝辞に代えさせていただきます。

中島 亮輔