

連続加圧方式による保水性試験装置の開発

畠山 正則*・京野 修*・川原 孝洋*

Development of Water Retention Test Apparatus According to The Continuous Pressurization Method

Masanori HATAKEYAMA*, Shuu KYONO* and Takahiro KAWAHARA*

Abstract

The percolation characteristics of unsaturated ground obtained by evaluating the water retention and permeability characteristics from an unsaturated to a saturated state are used as important numerical information related to slope stability under rainfall and also for assessing the percolation and stability of river levees. However, there have been very few reports on obtaining the percolation characteristics of unsaturated ground through laboratory tests and in-situ tests. This is likely due to the complexity of the testing methods and the long time required to obtain results. To improve the efficiency of water retention tests and shorten the test period, we developed a new water retention test apparatus using a continuous pressurization method to replace the conventional staged pressurization method using air pressure. This new test apparatus continuously measures the suction from the change in air pressure, by using a micro-tensiometer attached to the center of the specimen, to continuously measure the pore water pressure within the specimen. The suitability of the water retention test by the continuous pressurization method was evaluated by comparing it with the conventional staged pressurization method (pressure plate method). In the comparison test, water retention curves were obtained for Toyoura sand, DL clay and Hiroshima decomposed granite soil, as samples of different grain size composition, from water drainage to water absorption. The resulting water retention curves obtained by both test methods closely matched each other, not only for drainage but also for absorption, thus confirming the suitability of the test method. In addition, the test by the continuous pressurization method requires much less time than the conventional staged pressurization method.

Keywords: Water retention test, Water retention curve, Unsaturated soil, Laboratory test

(要 旨)

不飽和地盤の浸透特性は、不飽和から飽和に至る過程の保水特性と透水特性を評価することで、降雨時の斜面安定問題や河川堤防の浸透・安定性評価などに重要な数値情報として利用される。しかし、不飽和地盤の浸透特性を室内試験や原位置試験によって求め、その値を解析に結び付けている事例は極めて少ないのが現状である。その要因としては、試験方法が複雑であることや、試験結果を求めるために「非常に長い時間を要する」ことであると考えている。著者らは、保水性試験の効率化と試験時間の短縮を目的として、従来の段階的な空気圧の加圧方式に代わる「連続加圧方式」による新しい保水性試験装置を開発した。開発した試験装置は、供試体内の間隙水圧を連続的に測定できるマイクロテンスイオメータを供試体中央に取り付け、空気圧変化によるサクションを連続的に測定できる構造とした。「連続加圧方式による保水性試験法」の妥当性については、従来法である「段階加圧法（加圧板法）」との比較試験により評価した。比較試験では粒度構成が異なる豊浦砂とDLクレー、広島まき土を用い、排水過程から吸水過程の水分特性曲線を求めた。その結果、両試験法によって得られた水分特性曲線は、排水過程のみならず吸水過程においても極めてよい一致が見られ、連続加圧方式による試験法の妥当性が確認できた。また、連続加圧方式による試験時間は、従来の段階加圧法に比べて大幅に短縮できることを確認した。

キーワード：保水性試験, 水分特性曲線, 不飽和土, 室内試験,

* 応用地質(株)エンジニアリング本部

* OYO Corporation Engineering Headquarters

1. まえがき

1.1 研究の背景と目的

近年の地盤災害は、地球温暖化に伴う異常気象によって多発する局地的な集中豪雨や巨大台風に加え、頻発する巨大地震などが重なり合って大きな被害を発生させていることが特徴である¹⁾。災害を複合化させる大きな要因は、我が国の国土が脆弱な地形・地質であることが挙げられる。そのため、ひとたび災害が発生すれば、土石流やがけ崩れといった斜面災害、河川堤防の決壊や盛土の崩壊など、社会基盤に甚大な被害が発生する。

降雨浸透による斜面の安定問題では、斜面内部の飽和度の上昇に伴うせん断強度の低下が、その崩壊原因の一つと考えられている。降雨による斜面の崩壊現象を予測するためには、降雨時の地盤の浸透特性や土のせん断強度・変形特性に与える飽和度の影響について知ることが重要となる。しかしながら、実務あるいは研究分野においても地盤の不飽和浸透特性を室内試験によって評価し、その値を解析に結び付けている事例は極めて少ないのが現状である。

一方、河川堤防に対する浸透による被害は、洪水時の河川水や降雨が堤体や基礎地盤に浸透することによって間隙水圧が上昇し、堤体の強度が低下することが大きな要因と考えられている。そのため、浸透に伴う堤体のり面の安全性の評価にあたっては、不飽和から飽和あるいは飽和から不飽和に至る過程の土の水分保持特性と透水性を適切に評価することが望ましい。「河川堤防の構造検討の手引き²⁾」では、不飽和土の水分特性や透水特性を考慮した検討方法が示されているが、浸透流計算に用いる不飽和浸透特性については、実務的な割り切りのもと、土質分類別に標準的な数値が設定されている。

また、研究分野においては、豪雨・洪水時に堤体内で生じる現象を再現するための高度な数値解析が行われている。しかし、実際の堤体材料による水分特性や不飽和浸透特性を室内試験等によって評価し、その値を解析に結び付けている事例は極めて少ないのが現状である。

このように、不飽和浸透特性を求めるための室内試験が広く一般化していない大きな要因として、高度な試験技術を要することに加え、非常に長時間を要し、適切なタイミングで試験結果を提供できないことが挙げられる。そのため、工学的に十分な精度を有し、簡便かつ迅速に計測できる室内試験方法の確立が望まれていた³⁾。

このような背景を踏まえ、著者らは、試験の効率化と試験時間の短縮を目的として、従来の段階的な空気圧の加圧方式に代わる「連続加圧方式による保水性試験装置」を開発した^{4)~8)}。

本論文では、開発した連続加圧方式による保水性試験装置の特長や性能、試験方法を述べるとともに、従

来法である段階加圧法（加圧板法）で得られた試験結果との比較や、加圧速度に関する検証結果をもとに、連続加圧方式による保水性試験の妥当性、有効性について述べる。

1.2 論文の構成と概要

本論文で述べる各節の概要を以下に示す。

2節では、土の保水性に関する既往の知見を整理するとともに、土の水分特性曲線に影響を与える間隙水の保持形態とサクシヨンの関係について整理した。

3節では、現行の保水性試験の課題を抽出した。水分特性曲線を求めるための保水性試験方法は、地盤工学会で標準化されているが、ここでは、吸引法と加圧法を対象に試験に長時間を要する原因の抽出を行った。

4節では、連続加圧方式による新しい保水性試験装置の開発に至った背景ならびに試験時間の短縮を目的とした既往の試験方法と研究の動向を探った。また、ここでは開発した試験装置の特長と性能について説明し、開発した試験装置の最大の特長ともいえるマイクロロテンシオメータの性能検証結果の詳細を示した。

5節では、連続加圧方式による保水性試験に関する具体的な試験方法や、試験結果の整理方法について示すとともに、良好な試験結果を得るための供試体作製手順（工夫）や試験条件などについて述べた。

6節では、豊浦砂、広島まさ土、DLクレーを用いて行った連続加圧方式による保水性試験結果と従来の段階加圧法の試験結果を比較し、連続加圧方式による保水性試験の妥当性、有効性を明らかにした。また、両者の傾向の違いとその要因を整理して、連続加圧方式と段階加圧法における試験実施上の課題を抽出した。

7節では、抽出された課題解決を目的として、豊浦砂、広島まさ土、DLクレーを用いて、空気圧の加圧方法（加圧パターン）や加圧速度等による検証結果から、連続加圧方式による保水性試験の適切な試験方法を提案した。また、従来の段階加圧法に関する測定限界についても記述した。

8節では、本論文のまとめとして、連続加圧法によって試験精度を向上しつつ、試験時間が大幅に短縮された点と連続加圧法に関する標準的な試験方法の提案（加圧パターン・加圧速度）を示すとともに、豊浦砂のような粒状体に対する段階加圧法の適用限界について述べた。

そして、9節のあとがきでは、連続加圧法による保水性試験に関する今後の展望について述べた。

2. 土の保水性について

2.1 土の保水性とサクシヨンの関係

2.1.1 土の三相構成

土は図-1に示すように土粒子（固相）、水（液相）および空気（気相）から構成されている。飽和土は空気の部分が完全に水で満たされた土であり、地下水面以下の土が対象となるが、豪雨時の安定性が問題となるような自然斜面や盛土の多くは、空気（気相）を含む不飽和土からなる。

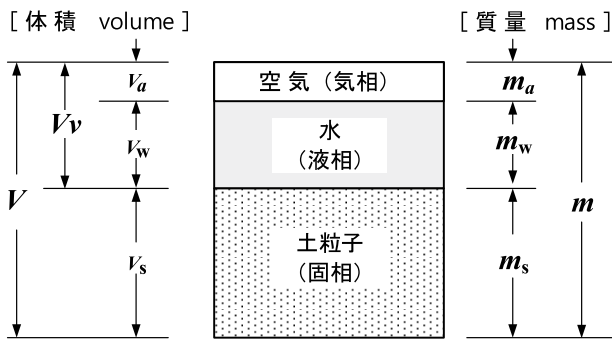


図-1 土の三相構成の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of the soil as a three phase system

ここに、 V :土の全体積

V_s :土粒子実質部分の全体積

V_v :間隙（水と空気）の体積

V_w :水の体積

V_a :空気の体積

m :土の全質量

m_s :土粒子実質部分の質量

m_w :水の質量

m_a :空気の質量

上記関係から土の飽和度 S_r は以下の式によって求められる。

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100(\%) \quad (1)$$

2.1.2 土中水の保持形態

不飽和土中の間隙空気と間隙水の存在形態の模式図を図-2に示す⁹⁾。図に示したように不飽和土中の間隙には、間隙水と間隙空気が混在している。

(1) 間隙水の保持形態

間隙水は土粒子表面の吸着力と土粒子間隙に発生する表面張力（毛管力）によって保持されている。土粒子間における土中水の保持形態の例を図-3に示す¹⁰⁾。図に示したように、二つの粒子の接触点近傍にある間隙水は、メニスカスの凹曲面に囲まれて存在する。この部分では、水と空気の間を生じる表面張力と、水と

粒子表面との間の接触角に起因する毛管力によって土中水が保持されている。

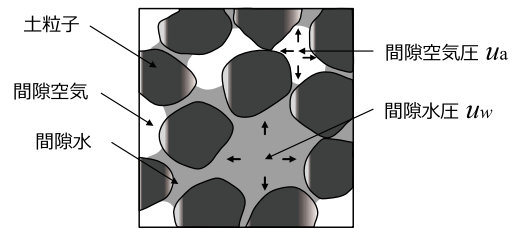


図-2 不飽和状態の間隙空気と間隙水の存在形態の模式図（文献9）の図-2.40を引用）

Fig. 2 Schematic diagram of pore air and pore water in the unsaturated state⁹⁾

(2) 水分量の違いによる水分保持形態の変化

不飽和状態では、土粒子に保持されている水は、図-4に示すように粒子表面で粒子からの強い吸着力によって保持（表面保水）されるとともに、一部は粒子の接触点近傍で毛管作用によって保持（間隙保水）されている。土の含水量が比較的多い不飽和状態では、図-4(a)に示すような状態で間隙水が保持されていると考えられている。粒子の接点における毛管水は、表面張力によってメニスカスを形成し、このときの毛管水圧は空気圧より小さいため、メニスカスは接点に向かって凸な形状となっている。

一方、土の含水量が低下し不飽和化が進むと、図-4(b)に示したように、土中水はメニスカスを形成せずに、土粒子表面に吸着（表面保水）するような形で保持される。

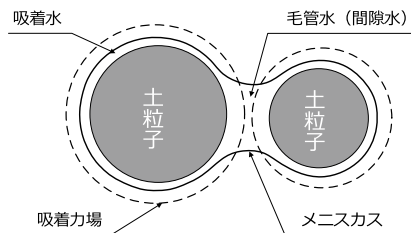


図-3 土中水の保持モデル（文献10）の図8.8を引用）

Fig. 3 Soil water retention model¹⁰⁾

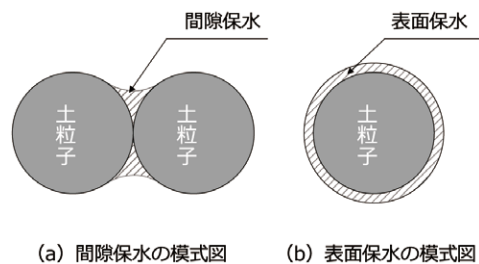


図-4 表面保水と間隙保水の模式図

Fig. 4 Schematic diagram of surface water retention and pore water retention

2.1.3 土の間隙とサクシジョンの関係

図-5に毛管現象の模式図を示した。大気圧下では、メニスカス上面に働く大気圧と、下端の水受けの表面にかかる大気圧は等しいと考えられるから、この大気圧 u_a と水圧 u_w (毛管圧) の圧力差にもとづく分だけメニスカスは押し上げられる。このような現象によって押し上げている力を毛管圧力またはサクシジョン s と呼んでいる。

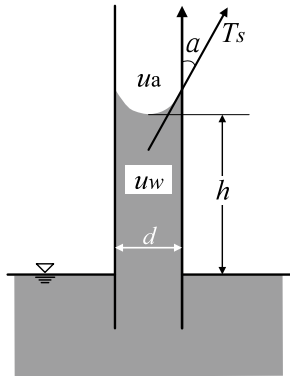


図-5 毛管現象の模式図
Fig.5 Schematic diagram of capillary phenomenon

また、毛管上昇高さ h は、土壌中の間隙を半径 r のパイプと仮定すると、以下の式で表される⁹⁾。

$$h = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\rho_w \cdot g \cdot r} \quad (2)$$

- ここに、 T_s : 表面張力
- α : 毛管内壁と水 (メニスカス) の接触角 (°)
- r : 毛管の半径
- ρ_w : 水の密度
- g : 重力加速度
- h : 毛管上昇高さ

式 (2) から明らかなように、毛管の半径 r が小さくなれば毛管上昇高さ h は高くなる。

上記関係から、サクシジョン s は次式で表される。

$$s = g \cdot \rho_w \cdot h = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{r} \quad (3)$$

不飽和状態の土中においては、土粒子間に形成されるメニスカスの曲率半径は、間隙水圧と間隙空気圧の大きさによって変化し、また、同じ水分量であっても土粒子の大きさや間隙径が異なれば、メニスカスの曲率半径も異なる。

土中においては、土粒子の大きさや間隙径は一様ではなく、複雑な構造を持っている。そのため、土中では圧力不連続が生じていると考えられているが、近似的に実際の土中の毛管上昇高さ h は以下の式から得られる¹¹⁾。

$$h = \frac{C}{e \cdot D_{10}} \quad (4)$$

- ここに、 h : 毛管上昇高さ (cm)
- e : 間隙比
- D_{10} : 有効径 (粒径加積曲線において質量通過百分率が 10 % のときの粒径) (cm)
- C : 粒径および表面の不純度等で決まる定数 (0.1-0.5 で変化) (cm²)

2.1.4 土の間隙と水分特性曲線の関係

土は様々な大きさの土粒子が混ざり合って構成されている。そのため、土中では土粒子の大きさや粒子間隙の大きさによって毛管力が異なっている。図-6は、土の間隙径の分布を毛管径の分布として毛管上昇高さ h との関係を示したものである。

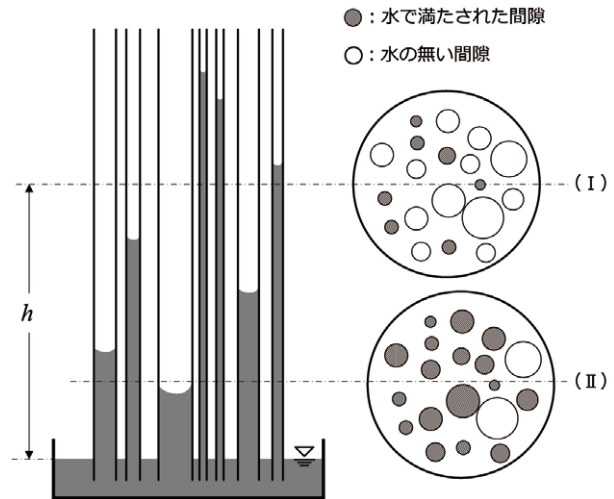


図-6 毛管径における吸引高さと同隙水の存在形態の模式図 (文献10) の図 8.31 を引用)
Fig.6 Schematic diagram of capillary rise and form of pore water¹⁰⁾

式 (3) に示したように、毛管上昇高さ h は毛管半径 r に逆比例することがわかる。太い毛管中では毛管上昇は小さく、細い毛管中ではその逆に大きくなる。図-6に示すように任意の毛管上昇高さ h の位置 (I, II) では、毛管束の断面を満たしている間隙水には違いがあることがわかる。毛管束のみかけの断面積に対する水の占める面積の割合は“含水率”に相当する。毛管上昇高さ h の低い II 断面では含水率は大きく、高い I 断面では低くなる。

図-7に示す水分特性曲線は、上述した任意断面に対する毛管上昇高さ h (サクシジョン) と、その断面に対する含水率 (含水比 w) の関係を表しているといえることができる。

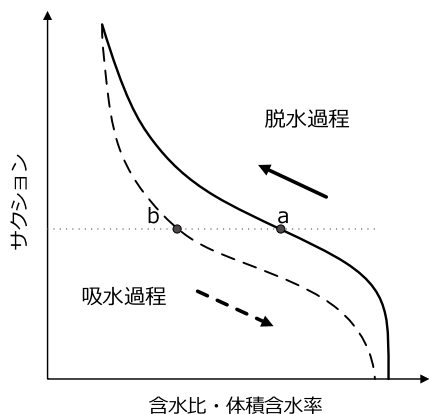


図-7 脱水過程と吸水過程の水分特性曲線の模式図 (水分特性曲線のヒステリシス)

Fig. 7 Schematic diagram of water retention curve during the drainage and absorption process (hysteresis of water retention curve)

また、水分特性曲線は図-7に示したように、脱水過程 (排水過程) と吸水過程とは異なった傾向を示す。

土粒子間の間隙は複雑な構造をもっているため、同一サクションの値に対して脱水過程で保持する水分量 (a点) は、吸水過程での水分量 (b点) より多いのが一般的である。このような現象を水分特性曲線のヒステリシスと呼んでいる。

脱水過程と吸水過程の曲線が異なる要因としてはインクピン効果の影響や、吸水時と脱水時の接触角の違いなどが理由として考えられている¹²⁾。すなわち、図-6のような径の異なる間隙が連続する場合の毛管水の移動は、吸水過程では大きい径を越える吸引力が必要なため移動しにくく、脱水過程では小さい径の吸引力で支配されるという理由による。原位置のサクションから水分量や不飽和透水係数を推定する場合、ヒステリシスが推定値に及ぼす影響は大きい。

2.2 水分特性曲線上の不飽和形態

水分特性曲線は、間隙中の水分保持状態に応じて図-8に示すような三つの不飽和形態に区分されている¹³⁾。

サクションが空気侵入値 (Air Entry Value: AEV)¹⁴⁾より小さな領域では、間隙内の空気は水で囲まれた気泡として存在することから「封入不飽和」と呼ばれている。封入不飽和状態では、サクションの増加に対する間隙水の大きな排水は発生しない。

サクションが空気侵入値を超えて大きくなると、間隙内に空気が侵入し、間隙水は顕著に排水する。さらにサクションを高めると、サクションの増加割合に対して排水量が徐々に減少する傾向を示す。この領域では、間隙内の水が十分に排水され、水はわずかに土粒子と土粒子の接触点の周りにメニスカスをつくって、その中に保持されている状態にあり、この状態は「懸垂水不飽和」と呼ばれている。

上述した封入不飽和状態から懸垂水不飽和状態に移行する領域については「過渡的不飽和」と呼ばれている。

上述した三つの不飽和形態における土粒子、間隙水、空気の状態を模式的に図-9に示した。

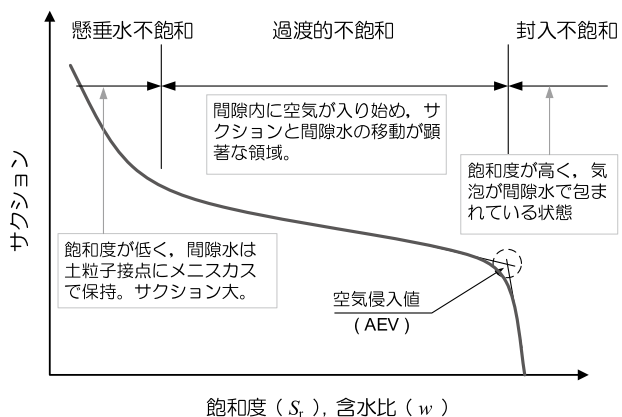


図-8 三つの不飽和形態と水分特性曲線 (文献13)の図4.6を引用)
Fig. 8 Three unsaturated forms and water retention curve¹³⁾

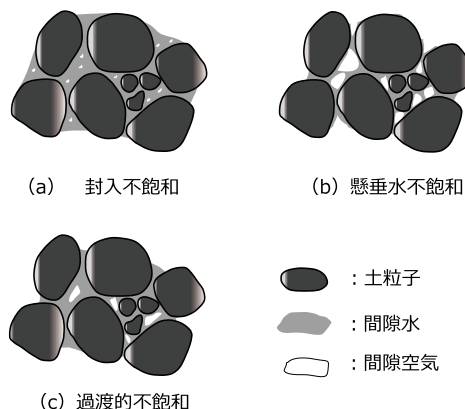


図-9 実際の土における三つの不飽和形態 (文献13)の図4.6を引用)

Fig. 9 Three unsaturated forms in actual soil¹³⁾

実際の土は様々な異なる粒径と間隙をもっているため、図-10に示したように、土の種類によって異なった水分特性曲線が得られる。

すなわち、大きな間隙を有する土 (砂・礫質土など) では、比較的小さなサクションで間隙水は排水され、懸垂水不飽和状態となるが、小さな間隙を有する土 (粘土・粘性土試料など) では、より大きなサクションまで封入不飽和状態にある。また、過渡的不飽和領域から懸垂水不飽和領域を確認するためには、より高いサクションを负荷した試験が必要となる。

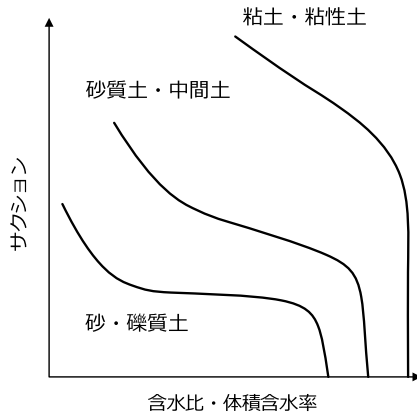


図-10 土質の違いによる水分特性曲線の模式図
 Fig. 10 Schematic water retention curve depending on difference in soil quality

3. 土の水分特性曲線を求めるための室内試験方法とその課題

土の保水性試験は、土の水分量（含水比 w ）と土中水のマトリックポテンシャル ψ_m の関係から水分特性曲線を求める試験法である。マトリックポテンシャル ψ_m は、飽和土や水面が大気と接しているような場合を基準（0 kPa）として、不飽和土では負値を示す。マトリックポテンシャル ψ_m は、マトリックサクシオン s 、圧力水頭 h と呼ばれるほか、その絶対値を単にサクシオン s と呼んでいる。本論文では、これらをサクシオン s と記して以下で使用する。

水分特性曲線は、図-10 や図-11 に示すように土の種類や密度ならびに含有鉱物などによって大きく異なることが知られている。

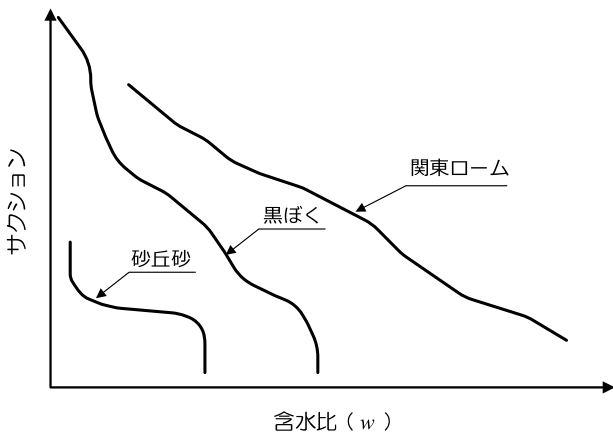


図-11 土の水分特性曲線の例（文献15）の図3.1を引用
 Fig. 11 Example of water retention curve¹⁵⁾

一般的な砂質土と粘性土の水分特性曲線の違いは、土粒子の配列や間隙の違いによっている。例えば、砂質土は間隙比が小さいものの、大部分はその間隙によって水が保持されており、その間隙水は小さな吸引圧（サクシオン）で排水される。

一方、粘性土は間隙比が大きく含水比（飽和水分

量）も高いが、粘性土には大きな間隙はほとんど無く小さな間隙によって水が保持されている。そのため、間隙水は大きな吸引圧（サクシオン）を加えないと排出されない。また、粘性土は砂質土に比べて非常に大きな比表面積を持つため表面に吸着されている水分量が多いのも特徴的である。

3.1 基準化されている土の保水性試験方法

水分特性曲線を求めるための室内試験方法は、表-1 に示すような方法が地盤工学会（JGS 0151）で基準化されており¹⁶⁾、必要とされるポテンシャル（サクシオン）の測定範囲に応じて試験方法が使い分けられている。

研究や実務においては、加圧法が多用されていたが、上述したように、試験に長時間かかることなどの理由から、実施される事例が少なくなっている実態にある。ここでは、新たに開発した連続加圧法との比較を目的として、基準化されている保水性試験方法の加圧法と、加圧法と同様にマトリックポテンシャルが得られる吸引法を取りあげ、試験方法の違いや試験実施上の課題について検討を加える。

表-1 土の保水性試験方法と測定範囲（文献16）の表2を引用
 Table 1 Water retention test methods and measurement ranges¹⁶⁾

試験方法		ポテンシャルの測定範囲 (kPa)
吸引法	水頭法	-0.1 ~ -30
	減圧法	-0.1 ~ -50
加圧法	加圧板法	-10 ~ -1500
	加圧膜法	-10 ~ -1500
遠心法		-10 ~ -1500
蒸気圧法		-3000 ~ -300000
サイクロメータ法		-300 ~ -150000

3.1.1 吸引法

図-12に吸引法（減圧法）による測定装置の例を示した。吸引法は、セラミックディスク（図中ではセラミック板）を介して負圧を土中水に接触させ、土中の水圧が負圧に平衡するまで排水した後、試料内の含水比と土中水のポテンシャルを測定する方法である。

吸引法には、図に示した真空ポンプを用いて減圧する「減圧法」の他に、排水ビュレットの水面の高さを調節する「水頭法」がある。

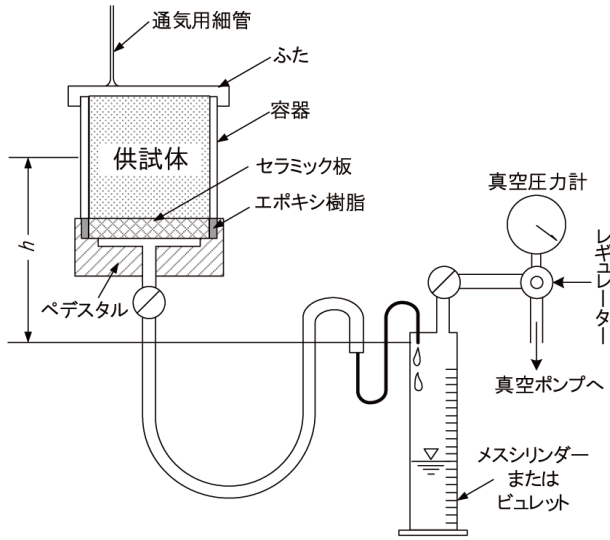


図-12 吸引法(減圧法)測定装置の例(文献16)の図2を引用
Fig. 12 Example of suction method (decompression method) test apparatus¹⁶⁾

(1) 試験方法

吸引法による試験方法は、供試体をセラミックディスク(セラミック板)の上に置き、セラミックディスクの下方から脱気水を供給し、毛管飽和させる。

毛管飽和後、供試体の空気圧を大気圧に保ちながら、所定の負圧(サクション s)を真空ポンプまたは水頭差で与える。負圧の与え方は、減圧法の場合は、レギュレータを通じて所定のサクションに相当する負圧を負荷する。水頭法では、供試体中心とビュレット水位との高低差 h を変えることにより、所定のサクションに相当する圧力 p (kPa)とする。負荷した圧力で水分平衡に達し排水が終了するまで、排水量の測定を続ける。

(2) サクションの決定

減圧法による試験は、試験容器内の空気圧 $u_a=0$ の状態ではレギュレータを通じて所定の負圧 p を供試体へ負荷していることから、サクション s は次式で算定される。

$$s = u_a - u_w = u_w \quad (5)$$

ここに、 s : 土中水のサクション (kPa)
 u_a : 間隙空気圧 (kPa)
 u_w : 間隙水圧(負荷した圧力 p) (kPa)

水頭法では、供試体中心とビュレット水位との高低差 h を変えることにより、所定の負圧 p を供試体へ負荷していることから、サクション s は次式で算定される。

$$s = \rho_w \cdot h \times 9.8 \times 10^{-2} \quad (6)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度 (g/cm³)
 h : 供試体中心とビュレットの水位との高低差 (cm)

3.1.2 加圧法

加圧法は、吸引法とは逆に土中水の圧力を大気圧下に保ちながら、供試体に正の空気圧を負荷して水分が平衡に達するまで排水させ、供試体内の含水比と土中水ポテンシャルを測定する方法である。加圧法は吸引法に比べて高いサクションを与えることができる点や、一つの供試体で複数のサクションと含水量の関係を得るための、いわゆる多点法が適用できることも利点のひとつである。

加圧法には、図-13に示すようなセラミックディスク等を用いる加圧板法と、図-14に示すようなセルローズ膜、微細多孔質膜等を用いる加圧膜法がある。両者ともに測定の原理は同じである。

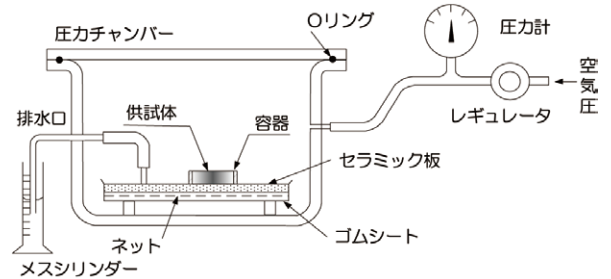


図-13 加圧法(加圧板法)想定装置の例(文献16)の図3を引用
Fig. 13 Example of pressurization method (pressure plate method) test apparatus¹⁶⁾

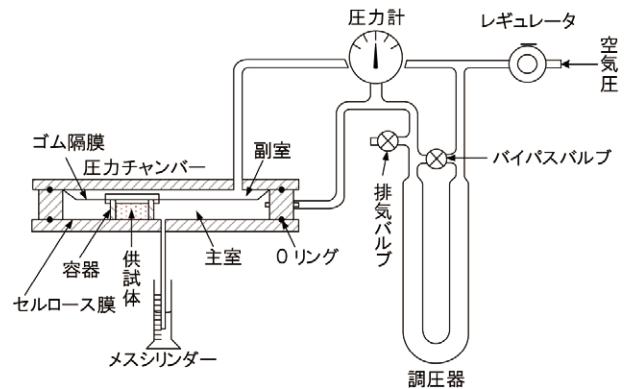


図-14 加圧法(加圧膜法)測定装置の例(文献16)の図4を引用
Fig. 14 Example of pressurization method (pressure membrane method) test apparatus¹⁶⁾

(1) 試験方法

加圧法は、試料中の間隙空気圧を大気圧に保ちつつ供試体に正の空気圧 p を負荷して、水分平衡に達し排水が終了するまで計測を続ける方法である。

供試体の設置から毛管飽和にいたる操作は、上述した吸引法と同様である。加圧板法および加圧膜法においても、レギュレータを通じて所定のポテンシャルに

相当する空気圧 p (kPa) を負荷する方法が一般的である。

一つの供試体で複数のサクシオンと含水量の関係を求める場合には、排水量から土の水分量変化を測定する。

(2) サクシオンの決定

水分平衡に達し排水が終了したとき、サクシオン s を次式によって算定する。

$$s=p \quad (7)$$

ここに、 s :土中水のサクシオン (kPa)
 p :空気圧 (kPa)

一般的には、水分特性曲線を描く場合は、毛管飽和状態から排水過程で4から6段階、吸水過程でも4から6段階の異なる空気圧を負荷した試験が行われている(図-15参照)。

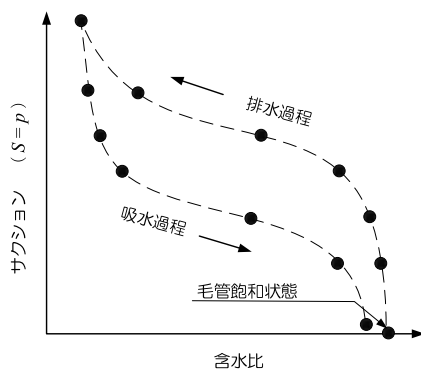


図-15 段階加圧法による試験結果の概念図

Fig.15 Conceptual diagram of test result by staged pressurization method

3.2 基準化されている土の保水性試験方法における課題

3.2.1 吸引法

吸引法の水分平衡時間は、土の種類や供試体の高さなどにより大きく異なるが、1圧力で数日要することも多い。そのため、段階加圧法によって水分特性曲線を求めるためには、数週間から数ヶ月を要する。試験時間を短縮するための方策として、供試体の高さを短くしたり、空気侵入値(AEV)の小さなフィルターを使用する方法が採られているが、その結果、均一粒径の砂質土や高いサクシオンの測定を必要としない粘性土試料に限定されてしまうこととなる。

水頭法では水位差により負圧を負荷する方式であるために、高いサクシオンを与えることはできない。

一方、減圧法は水頭法に比べると高い負圧を負荷することができるが、負圧を高くすることによって溶存空気の影響で配管内に気泡が発生し、セラミックディスク等が不飽和化することで、透水性が悪くなり、試

験途中で給排水が止まってしまう現象も発生する。

高い負圧を負荷するためには、事前に試験用水やセラミックディスク等の十分な脱気操作が必要であり、この操作が試験結果の良否を大きく左右することとなる。

いずれにしても、吸引法は粒径が均質な砂や礫質土が主たる対象試料となり、この試験方法によって水分特性曲線を求めるには、長時間かかることや脱水過程から吸水過程の水分特性曲線を求めることが難しい試験方法であるといえる。

3.2.2 加圧法

加圧板法では、表-1に示したように、マトリックポテンシャル Ψ_m (サクシオン s) の測定範囲は-10 kPa から-1500 kPaとされている。

測定範囲の最小値の-1500 kPa(サクシオンの最大値1500 kPa)は、試験に使用する市販のセラミックディスクの空気侵入値(AEV)に対応した値であるが、一般的には空気侵入値(AEV)が200 kPaから300 kPa(マトリックポテンシャル Ψ_m が-200 kPaから-300 kPa)のセラミックディスクが多く使用されている実態にある¹⁷⁾。

このことから、加圧板法で対象とする試料は砂質土や砂分を多く含む粘性土で、粘土試料のように高いサクシオン領域までを対象とする試験条件(例えば、図-8に示したような過渡的・懸垂水不飽和領域)には対応できない場合もある。

それでも、加圧法は吸引法に比べて高いサクシオン領域までの計測が可能であること、加圧過程(脱水過程)においては気泡の発生心配が少ないことや、一つの供試体で多段階の試験が可能であることから利用頻度は高い試験方法である。

しかし、減圧過程(吸水過程)においては、高い圧力で閉じ込められていた空気の膨張などによってセラミックディスクが不飽和化する。その結果、吸水過程の計測が不能な状態に陥る事例も多く、減圧(吸水)過程におけるデータ(測定事例)が少ない要因の一つと推察される。

一方、加圧板法も水分が平衡に達したかどうかを排水量の時間的変化から確認する方法が採られているため、1圧力で数日以上要することも多い。複数段階の圧力を順次作用させ、水分特性曲線を求める試験の場合には、砂試料でも約1ヶ月程度を要し、細粒分の多い粘性土試料にいたっては3ヶ月間を要する場合もある。

加圧膜法で使用しているセルロース膜、微細多孔質膜の厚さは、セラミックディスクに対して1/10~1/20程度の厚さであることから、試験時間を短縮できる効果が期待されている。反面、加圧膜法の場合は、空気との接触面よりわずかではあるが空気漏れは避けられず、試験時間が長い試料の場合には、空気と膜との接触時間が長くなり空気漏れが拡大して試験結果に

重大な影響を与えることもある。また、角張った礫などを含む試料では膜の表面を傷つけ、空気漏れや漏水等の要因となる場合がある。

4. 連続加圧方式による保水性試験装置の開発

4.1 新しい試験装置を開発するに至った背景

地盤工学会で基準化されている「土の保水性試験」の課題としては、非常に長い時間と多くの手間を要すること、吸水過程の水分特性曲線を求めることが難しいことが挙げられる。

従来の保水性試験では、透水性の良い砂質土の場合、少なくとも数日から20日程度の試験時間を必要としていた。また、粘性土の場合は、約1～2ヶ月の試験時間を必要とし、それ以上の時間をかけて試験を行っていたことも珍しくなかった。

また、既往の論文等では脱水過程の試験結果が多く、吸水過程を含む報告が少ない現状にある。この理由としては、試験時間の長期化が脱気水への空気の侵入と、それに伴う試験精度の低下を招いていることが推察されることから、短時間で試験を終了させる必要性があった。

一方、豪雨等における河川堤防や盛土斜面の安定性検討においては、不飽和状態から飽和状態に移行する過程が最も重要であり、吸水過程（不飽和状態から飽和化する過程）の試験結果が必要とされる。そのため、不飽和状態から飽和状態に移行する過程の水分特性曲線（吸水過程の水分特性曲線）を簡便かつ迅速に計測できる試験装置の開発と試験方法の確立が望まれていた。

4.2 時間短縮を目的とした既往の保水性試験方法

以下に、試験時間の短縮を目的とした既往の試験方法について述べる。

4.2.1 マルチステップ流出法

(1) 試験方法の概要

マルチステップ流出法は、上述した加圧板法と同様に空気圧を段階的に加圧（減圧）して、供試体からの排水量（吸水量）と供試体内の間隙水圧を測定して、水分特性曲線を求める方法である。

マルチステップ流出法と地盤工学会（JGS 0151）で基準化されている方法との違いは、前者は供試体内の間隙水圧を測定する点と、水分平衡状態を確認しないで次の圧力段階の空気圧を加圧する点にある。

マルチステップ流出法では、水分平衡状態を確認しないで次の圧力段階に加圧することから、試験時間は大幅に短縮され、砂質土で1日、粘性土でも10～15日程度で試験が終了するところが特長である。

マルチステップ流出法で使用する試験装置の例を図-16に示し¹⁸⁾、水分特性曲線を求めるための試験手順を以下に記述する。

- ① フィルターを脱気飽和させ、供試体を試験装置に設置する。
- ② 供試体下部より上昇流で供試体を飽和させる。
- ③ 水圧測定用圧力計（テンシオメータ）を供試体中心に挿入する。
- ④ 供試体上部から空気圧を加圧して試験を開始する。
- ⑤ 供試体からの排水量と水圧測定用圧力計の変化を測定する。
- ⑥ 排水量がなくなり、ほぼ水分平衡状態とみなせる状態に達したら、段階的に次の空気圧を加える。
- ⑦ 水分特性曲線は、加えた空気圧と水分量の関係を用いて描く。

なお、マルチステップ流出法における水分特性曲線は、圧力水頭と体積含水率の関係を用いて描かれる。ここで、圧力水頭は供試体に加えた空気圧（水頭換算）と供試体内の間隙水圧（水圧測定用圧力計の値）との差分で定義している。体積含水率は、飽和体積含水率と供試体からの排水量から求められる体積含水率との差分で求めている。

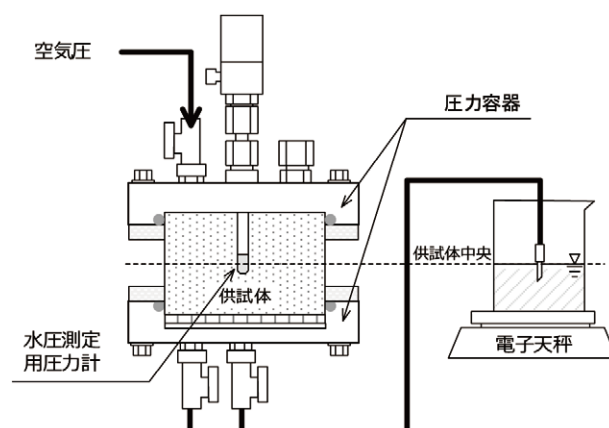


図-16 マルチステップ流出法の試験装置（文献18）の図1を引用

Fig. 16 Test apparatus for multi-step outflow method¹⁸⁾

(2) 試験方法の課題

試験上の課題としては、水分平衡状態を確認しないで空気圧を段階的に加圧していることから、水分特性曲線を描くためには、定常状態における圧力水頭（サクション）と体積含水率（含水比）を決定しなければならない。マルチステップ流出法では、解析ソフトを用いて定常状態における圧力水頭と体積含水率を決定している。解析にあたっては、空気圧の加圧に対して、流出量（加圧過程では排水量、減圧過程では吸水量）の状態を判断し解析を行うことから、解析者の熟練した知識を要することが、課題となっている。

4.2.2 空気圧を連続的に負荷する方法

(1) 試験方法の概要

阿部らは、土の保水性試験をより迅速に行うための新たな試験法の確立を目的として、供試体にサクシオンを連続的に負荷する手法（連続加圧法）を採用した保水性試験装置を開発している¹⁹⁾。

従来法（加圧板法）と連続加圧法における加圧形態の違いを図-17に示した。

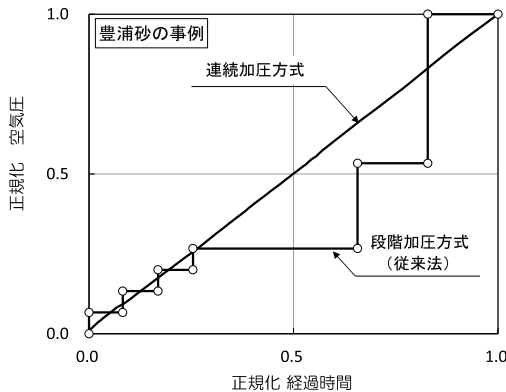


図-17 空気圧の加圧形態の違い

Fig. 17 Difference in pressurization between the two test methods

図に示したように、加圧形態の違いを「土の圧密試験」に例えると、従来法は「段階荷重方式」で連続加圧法は「定ひずみ速度荷重方式」または「漸増荷重方式」に相当するものである。加圧形態の違いは、試験時間に大きく影響する。

また、従来法では加圧した空気圧によって、排水や吸水が一定値に落ち着いた時の空気圧をサクシオン s として定義しているが、連続加圧法では、供試体中央部に設置した直径 3 mm のマイクロテンシオメータで測定される間隙水圧 u_w と空気圧 u_a からサクシオン s を定義している。この方法によって試験時間は大幅に短縮され、砂質土で 7 時間～1 日、粘性土でも 2 日以内で脱水過程と吸水過程の水分特性曲線が得られることを確認している。

阿部らが開発した試験装置は、試験容器（圧力室）、空気圧の制御用として電/空変換器と信号発生器（マルチファンクションシンセサイザ）から構成されている。また、供試体からの吸・排水量の測定用として電子天秤が用いられている。間隙水圧測定用のマイクロテンシオメータは、図-18に示したように、供試体（直径 50 mm、高さ 20 mm）の中央に横向きに挿入される構造となっている。

試験手順を以下に示す。

- ① マイクロテンシオメータを脱気飽和させる。
- ② 飽和させたマイクロテンシオメータを試料容器の側面より供試体内に水平に挿入する。漏水・漏気の防止のためにシリコン接着剤でシールする。
- ③ 圧力室を組み立てる。

- ④ 供試体を毛管飽和させる。
- ⑤ 空気圧の加圧波形を選択し、供試体上部から空気圧を負荷して試験を開始する。
- ⑥ 試験中は、空気圧、供試体からの排水量とマイクロテンシオメータの圧力の変化を測定する。
- ⑦ 水分特性曲線は、サクシオンと含水比の関係で描く。なお、サクシオン s は空気圧 u_a とテンシオメータで測定される供試体内の間隙水圧 u_w の差分で定義している。

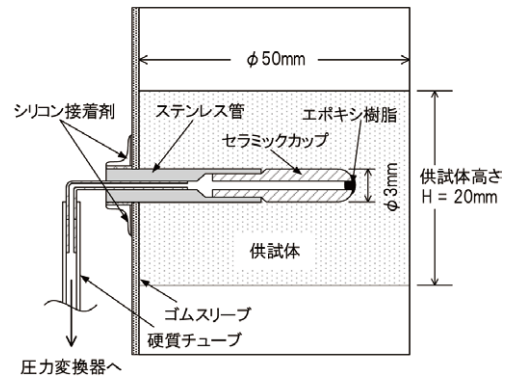


図-18 マイクロテンシオメータを取り付けた試料容器（文献 19）の図 2.7 を引用）

Fig.18 Sample container with micro-tensiometer¹⁹⁾

(2) 試験方法の課題

これまでに報告されている豊浦砂や千曲川砂の攪乱試料の水分特性曲線は、従来法（加圧板法）の試験結果ともよく対応した結果が報告されている^{19)～23)}。また、排水過程と吸水過程の繰り返しによる再現性も高いことが報告されていた。

しかし、試験装置に関しては二つの課題が挙げられる。一つは、マイクロテンシオメータを試料容器に水平に挿入することが非常に難しく、挿入時に乱れを与えてしまう可能性があった。

もう一つは、マイクロテンシオメータと試料容器の側面を毎回シリコン接着剤でシールすることは、試験の効率的な処理を阻害する要因となっていた。

4.3 開発した試験装置の概要

新しい保水性試験装置の開発に当たっては、阿部ら^{19)～23)}の方法と同様に以下の方式を採用した。

- ① 空気圧 u_a を連続的に変化（増加，減少，保持）させる。
- ② 試験中の間隙水圧 u_w を計測してサクシオン s ($s = u_a - u_w$) を決定する。
- ③ 間隙水圧の計測にはマイクロテンシオメータを使用する。

なお、開発した連続加圧方式（以下、連続加圧法と記す）による新しい保水性試験装置の全景を写真-1に示し、表-2には装置の仕様を示した。

表-2 試験装置の概略仕様

Table 2 Outline specifications of the test apparatus

項目	仕様
試験容器	圧力室の耐圧：1MPa 直径：50mm，高さ：25mm，50mm
空気圧，間隙水圧測定	圧カトランスデューサー 測定レンジ：0～700kPa 精度：±0.25%F.S（非直線性，ヒステリシス，再現性）
排水量変化測定	精密電子天秤 測定秤量レンジ：0～2000g 最小表示：0.01g
空気圧の調圧装置	高精度レギュレータ 最大加圧能力：200 kPa 加圧速度の設定レンジ：0.001 kPa/min～10 kPa/min

4.3.1 試験装置の特長

試験装置は、写真-1に示すように、試験容器（圧力室）、電子天秤（排水量の自動計測用）、調圧装置、計測用ロガーおよび制御用のパソコンで構成される。

本装置の特長を以下に示す。

(1) 空気圧の調圧装置

調圧装置は、レギュレータとステッピングモータを組み合わせたタイプのものを採用した。これは、通常用いられている電/空変換器に比べて高い分解能で制御できることと、停電時においても圧力が保持され、急激な圧力低下が発生しないように安定性を重視したためである。

(2) 計測用ロガーと計測・制御用パソコン

計測制御装置の特長として、空気圧の加圧スケジュールを簡単に設定できることが挙げられる。さらに設定の煩雑さを解消する目的から、一度設定した加圧パターンは、設定情報ファイルに自動的に保存され、再度使用する場合や、設定圧力のみを部分修正する操作が簡便に行えるようなシステムとした。

試験中の空気圧と間隙水圧ならびに排水量がパソコンのディスプレイに表示され、試験途中であっても適切な試験条件に任意に変更できるシステムとした。

4.3.2 試験容器の特長

試験容器の構造を図-19に示した。

空気圧は、供試体上部から加圧し、供試体からの排水は容器下部のセラミックディスクを通して行われる。以下に試験容器の特長を示す。

- ① 試験容器の底板には、図-19、写真-2に示したようにマイクロテンシオメータを鉛直に取り付け、設置時に供試体に与える乱れの低減と、供試体中央の間隙水圧 u_w が正確に計測できる構造とした。
- ② マイクロテンシオメータに取り付けているセラミック製のポーラスカップの空気侵入値は、50 kPa、100 kPa、200 kPaのものを用意し、試料に応じて使い分けが可能な構造としている。
- ③ 試験容器は、内径5 cmの亚克力円筒容器とし、高さ5 cmまでの供試体が設置できる構造とした。円筒容器を亚克力製にすることで毛管飽和過程や試験中の試料状態が確認できるようにした。

なお、マイクロテンシオメータを鉛直に取り付ける方式には以下のメリットがある。

- ① 加圧・減圧中に供試体が体積変化を起こしてもその影響を受けにくい。
- ② 供試体に設置する煩雑さが少なく、設置時に供試体に与える攪乱の影響が小さい。
- ③ 漏水や漏気に対する安定性が高い。
- ④ 圧力計までの経路を短くすることができ、圧力測定精度の向上が期待できる。



写真-1 試験装置の全景（連続加圧方式による保水性試験装置）

Photo. 1 Full view of test apparatus (water retention test apparatus using the continuous pressurization method)

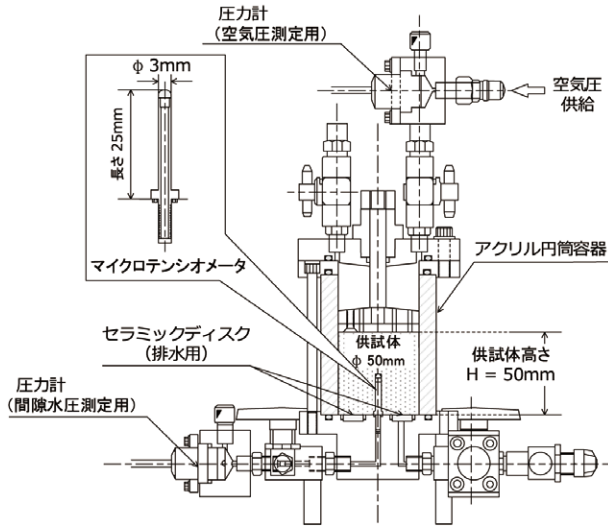


図-19 連続加圧方式用に開発した試験容器
 Fig. 19 Test vessel developed for continuous pressurization method

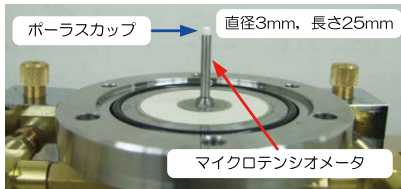


写真-2 マイクロテンシオメータの設置状況
 Photo 2 Installed state of micro-tensiometer

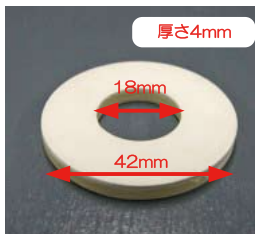


写真-3 セラミックディスクの形状
 Photo 3 Shape of ceramic disk

4.4 開発した試験装置の性能

開発した試験装置の仕様を、表-2に示したが、以下には各部の性能を検証した結果について述べる。

なお、本節以降では「セラミックフィルター」の用語は、市販されている素材名を指し、試験用に加工した器具をそれぞれ「ポラスカップ」および「セラミックディスク」として記述する(写真-2, 写真-3参照)。

4.4.1 調圧装置の性能

調圧装置は、レギュレータとステッピングモータを組み合わせたタイプのものを採用し、空気圧の制御を行っている。

図-20に空気圧調圧装置による検証実験結果を示した。

図-20(a)は連続加圧・減圧過程の結果で、空気圧を最大50kPaまで加圧した後に減圧し、圧力容器内で測定された空気圧の結果と比較した。加圧、減圧速度は0.1kPa/minとしている。

図に示したように、空気圧の測定値は設定(調圧)値に対して大きな変動もなく高い精度で制御されていることがわかった。

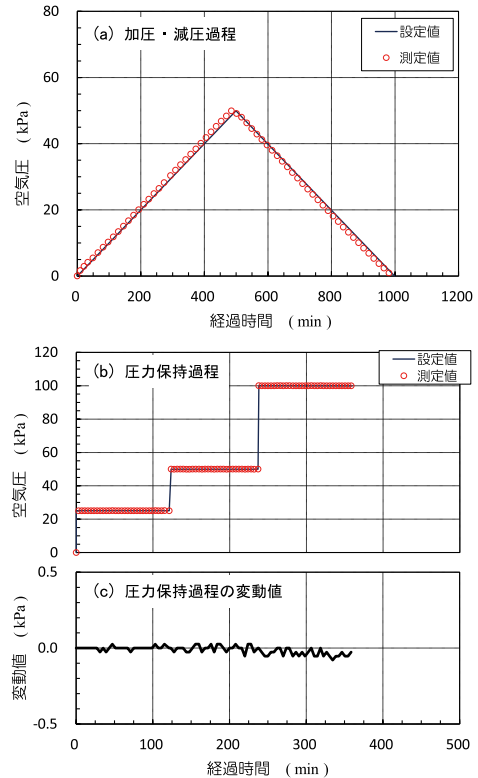


図-20 空気圧調圧装置の検証実験結果
 Fig. 20 Verification test result for air pressure regulating device

図-20(b)は、圧力保持過程の結果で、段階的に0~25~50~100(kPa)の加圧制御を与え、圧力容器内で測定された空気圧の結果と比較したものであり、各圧力で120分間保持させた結果である。

図-20(c)には圧力保持過程の設定値と測定値の圧力差を変動値として示した。圧力保持状態での空気圧の変動幅は0.1kPa以下で十分な精度で保持されていることがわかった。

以上のように、空気圧の調圧装置に関しては、加圧・減圧過程ならびに圧力保持過程においても、高い精度で制御されていることを確認した。

4.4.2 セラミックディスク、ポラスカップの性能

本装置では、市販のセラミックフィルターを加工して、供試体底部からの排水用のフィルター(セラミックディスク)や間隙水圧測定用のフィルター(ポラスカップ)として使用している。

表-3にはセラミックフィルターのカタログ値と検証結果を示した。

表-3 セラミックディスクの性能一覧表
Table 3 Performance of ceramic disk

カタログ値		検定結果			
空気侵入値 (kPa)	透水係数 (m/sec)	空気侵入値 (kPa)	空気圧 (kPa)	毎分透水量 (g/min)	透水係数 (m/sec)
100	7.6×10^{-9}	220	20	0.20	4.8×10^{-9}
			50	0.52	
			90	0.93	
200	6.3×10^{-9}	400以上	50	0.06	5.5×10^{-10}
			90	0.11	
			150	0.18	

(1) 空気侵入値

セラミックフィルターの空気の通り難さは「空気侵入値」として表される。本装置に使用した空気侵入値 100 kPa と 200 kPa のセラミックディスクについて、空気侵入値の検証を行った。

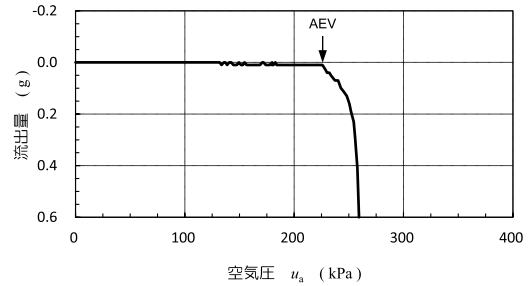
図-21(a) は、カタログ値 100 kPa のセラミックディスクに対して行った検証結果である。空気圧が約 220 kPa に達したあたりで空気の侵入が見られ、流出量が大きく増加している。一方、図-21(b) は、カタログ値 200 kPa のセラミックディスクに対して行った検証結果であるが、空気圧を 400 kPa まで加圧しても顕著な流出量の増加は確認できなかった。このことから、カタログ値と実験値には違いがあり、実際にはカタログ値の 2 倍以上の性能を有することを確認した。

(2) 透水性

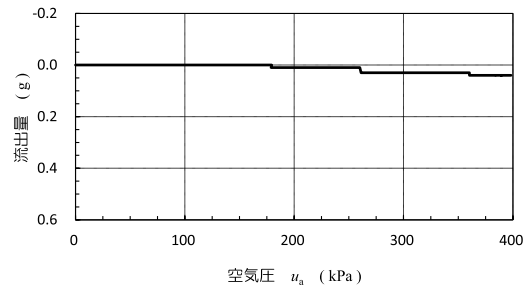
図-22、図-23 にセラミックディスクの透水性に対する検証結果を示した。

図-22 にはカタログ値 100 kPa のセラミックディスクの検証結果を示した。カタログ値では透水係数が $7.6 \times 10^{-9}(\text{m}/\text{sec})$ であったが、表-3 に示したように 3 段階の圧力に対する透水量から求めた透水係数の平均値は、 $4.8 \times 10^{-9}(\text{m}/\text{sec})$ と、カタログ値と比較的に近い値であった。

一方、図-23 にはカタログ値 200 kPa のセラミックディスクの検証結果を示した。カタログ値では透水係数が $6.3 \times 10^{-9}(\text{m}/\text{sec})$ で 100 kPa のセラミックディスクと近い値であった。検証結果は、表-3 に示したように 3 段階の圧力に対する透水量から求めた透水係数の平均値は $5.5 \times 10^{-10}(\text{m}/\text{sec})$ と、カタログ値よりも 1/10 以上低いことを確認した。



(a) カタログ空気侵入値 100kPa



(b) カタログ空気侵入値 200kPa

図-21 セラミックディスクの空気侵入値の検定

Fig. 21 Examination of air entry value of ceramic disk

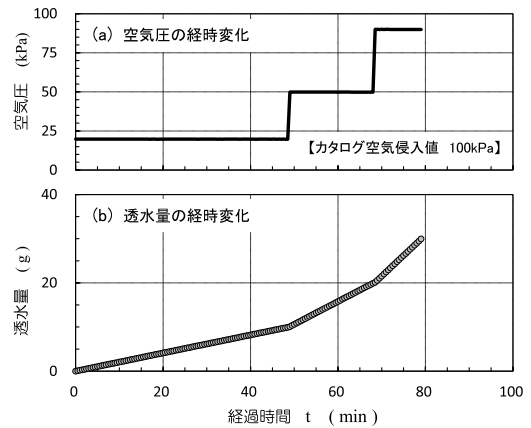


図-22 セラミックディスクの透水係数の検定 (100 kPa)

Fig. 22 Permeability coefficient of ceramic disk (100 kPa)

4.4.3 セラミックディスクとポーラスカップの圧力変化に対する反応

保水性試験では、飽和状態から不飽和状態における供試体内の間隙水圧や排水量を測定しているの、ここでは、セラミックディスクとポーラスカップの水中および水の無い状態での圧力変化に対する反応を検証した。

図-24 には、試験容器に水を入れた状態で空気圧を変化（加圧、減圧）させ、その時のセラミックディスクとマイクロテンシオメータ（ポーラスカップ）の圧力を計測した結果を示した。図に示したように、試験容器に水を入れた状態では、空気圧 P_a の変化に対してセラミックディスクとマイクロテンシオメータ（ポーラスカップ）で測定された圧力 (P_d , P_l) は、時間的な遅れもなく、精度良く測定されていることが確認できた。

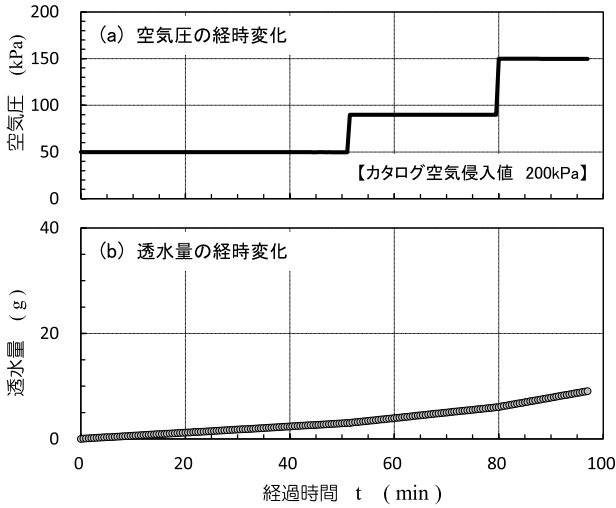


図-23 セラミックディスクの透水係数の検定 (200 kPa)
 Fig. 23 Permeability coefficient of ceramic disk (200 kPa)

一方、試験容器内に水が無い状態で行った検証結果を図-25に示した。セラミックディスクで測定された圧力 P_d は、水中の結果と同様に時間的な遅れもなく、精度良く測定されている。しかし、マイクロテンシオメータ（ポーラスカップ）で測定される圧力 P_t は、図に示したように、空気圧を加圧して間もなく圧力差が発生し、空気圧が約 20 kPa より高くなると徐々にその差が大きくなる結果となった。減圧過程では、加圧過程と逆の現象が確認され、最終的には加圧前の値に収束する結果となっている。

これらの要因として、ポーラスカップの材質と形状に起因していることが考えられる。ポーラスカップの素材に用いられているセラミックフィルターは、微細で多孔質な焼結体であり、水は通しても、ある圧力までは空気を通し難い特徴を有している。空気圧の増加に伴って水が侵入できる状況では、図-24(c)のようにマイクロテンシオメータでも空気圧とほぼ等しい圧力が計測される。しかし、水の無い状況では、マイクロテンシオメータの先端に取り付けられている小さなポーラスカップ内の水が、空気圧の上昇に対して移動（ポーラスカップ表面の移動）できる間は、圧力計に圧力を伝達できても、水の移動が少なくなると、圧力計に圧力が伝わらず、空気圧との圧力差が大きくなるのではないかと考えられる。これに対して、表面積（体積）の大きいセラミックディスクでは、空気圧の上昇で圧力計に伝わるのに十分な水の移動があるため、空気中（水の無い環境）においても、精度良く空気圧の変化が測定されているものと考えている。

なお、実際の試験時には、高いサクション値（供試体の飽和度が低い状態）にあっても、土中水が図-4に示したような保水状態にあれば、上述したようなマイクロテンシオメータ周辺に全く水が無くなる状態には至らないと考えられる。

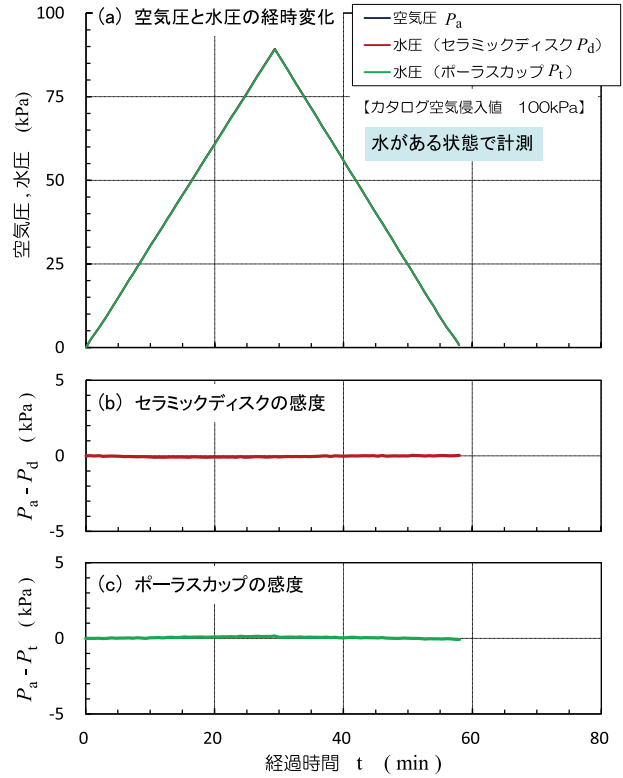


図-24 セラミックフィルターの感度 (水中)
 Fig. 24 Sensitivity of ceramic filter (under water)

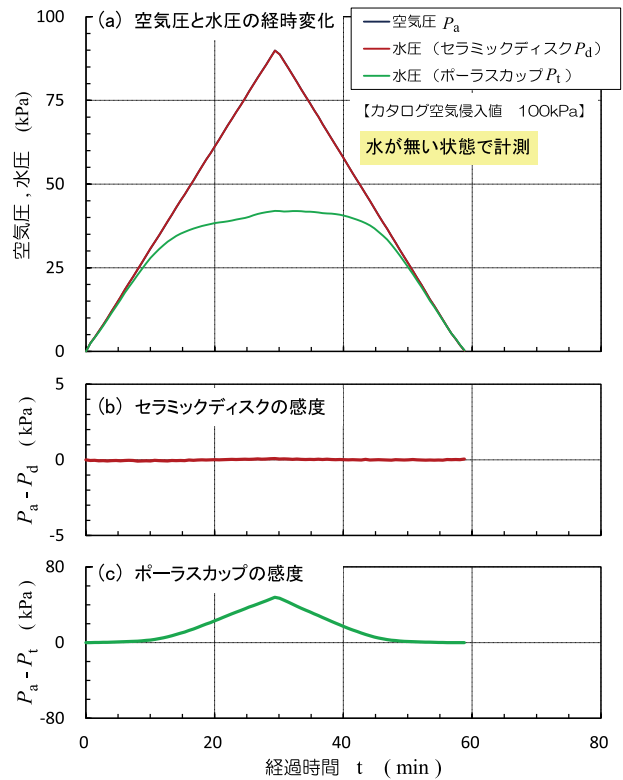


図-25 セラミックフィルターの感度 (空气中)
 Fig. 25 Sensitivity of ceramic filter (in air)

5. 連続加圧法による保水性試験方法

5.1 試験方法と結果の整理方法

5.1.1 連続加圧法によるサクシオンの定義

連続加圧法による保水性試験は、空気圧 u_a を連続的に増減させながら、供試体中央部における間隙水圧 u_w と供試体からの排水量を計測する方式である。したがって、従来の加圧板法のように各圧力段階で水分量の平衡状態は確認できないので、水分特性曲線を描くのに必要なサクション s は次式で算定する。

$$s = u_a - u_w \tag{8}$$

ここに、 s :サクション (kPa)
 u_a :空気圧 (kPa)
 u_w :間隙水圧 (kPa)

図-26には連続加圧法による保水性試験結果の概念図を示した。

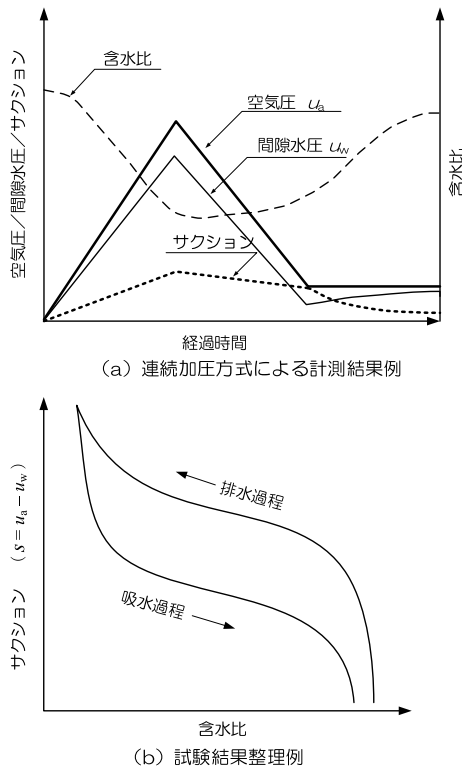


図-26 連続加圧法による保水性試験結果の概念図
 Fig. 26 Conceptual diagram of water retention test result by continuous pressurization method

図-26(a)は連続加圧法による計測結果例である。図中には、空気圧 u_a 、供試体中央に設置したテンシオメータで測定される間隙水圧 u_w 、供試体含水比 w ならびにサクション s の経時変化例を示した。

含水比 w は試験開始前の水分量 m_i と試験中の排水量 Δd から次式で算定する。

$$w = \frac{m_i - \Delta d}{m_s} \times 100 \tag{9}$$

ここに、 w :含水比 (%)
 m_i :試験開始前の水分量 (g)
 Δd :試験中の排水量 (g)
 m_s :土試料の乾燥質量 (g)

図-26(b)には含水比 w とサクション s の関係から排水過程と吸水過程の連続的な水分特性曲線の計算結果例を示した。連続加圧法では、図-15に示した段階加圧法の結果例に対して連続的な水分特性曲線を描けることが特長的である。

5.1.2 連続加圧法における空気圧の加圧方法

空気圧の加圧方法については三角形載荷、台形載荷、ノコギリ形載荷の三つの方法がある¹⁹⁾。本研究では図-27に示した三角形載荷と台形載荷の二つの方法⁸⁾を採用した。以下にそれらの特徴について述べる。

(1) 三角形載荷方法

三角形載荷は、細粒分の少ない砂質土のような水分保持力が小さく、空気圧の負荷に対して排水遅れが生じない試料に適した方法である。

(2) 台形載荷方法

台形載荷は、三角形載荷の加圧過程では十分な排水がされないような細粒分を多く含んだ砂質土や粘性土に適している。空気圧の増加に対してサクシオンの発生が小さい場合に、一定圧力状態を保持することで間隙水圧の消散を補い、より高いサクシオンの値を求めることを期待する方法である。

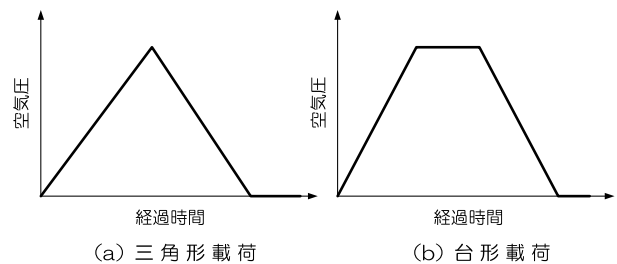


図-27 空気圧の加圧方法の例(文献8)の図-7を引用)
 Fig. 27 Examples of air-pressurized method⁸⁾

5.2 供試体の作製方法と手順

供試体の作製から圧力容器への設置方法に関しては基本的に地盤工学会規準「土の保水性試験方法」(JGS 0151)に準拠して行うが、連続加圧法では供試体の中央にマイクロテンシオメータを設置するところが他の試験方法と大きく異なる点である。

図-28に供試体の作製から圧力容器への設置の流れ

を示し、写真-4には供試体の作製に使用する器具類を示した。また、写真-5には、締め固めによって供試体を作製する過程からマイクロテンシオメータ設置用の孔あけ、圧力容器への設置までの手順を示した。

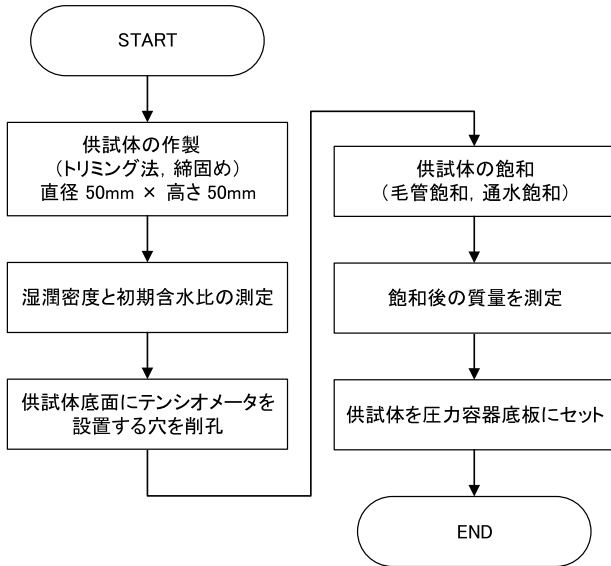


図-28 供試体の作製から圧力容器への設置の流れ
Fig. 28 Flowchart from preparing a specimen to installing it in a pressure container

5.2.1 供試体の作製に使用する器具

試験に使用する供試体は、攪乱試料と不攪乱試料の両方に対応可能であるが、写真-4(a)に示したように締め固めて供試体を作製する場合は、二つ割りモールド、締め固め用の突き棒などで行う。また、連続加圧法では供試体底面にマイクロテンシオメータを挿入するための孔あけが必要なので、写真-4(b)に示したようなドリルを使用する。マイクロテンシオメータを供試体に挿入するための孔あけの手順については以下に記述する。



写真-4 供試体の作製に使用する器具
Photo 4 Tools used for specimen preparation

5.2.2 供試体の作製から圧力容器への設置の手順

供試体は直径 50 mm、高さ 50 mm の円柱状に成形した試料を使用する。

締め固めによって供試体を作製する手順を写真-5(a)～(c)に示した。作製した供試体は(d)に示したようにアクリル円筒容器に移し、スペーサーディスク(アクリル製)を挿入して、アクリル円筒容器と同じ高さとする。

テンシオメータを挿入するための孔あけ手順は、写真-5(e)～(g)に示し、以下にその手順を述べる。

- ① 供試体を入れたアクリル円筒容器に、削孔ガイド付きアクリル円筒押えフランジ(上部)と下部のフランジを取り付け、削孔中に供試体が移動しないように固定する。(e)
- ② 孔あけ用ドリルを電動ドリルにセットして、マイクロテンシオメータを設置するためのガイドとなる仮孔をあける。(ドリルで削り出した土は全て回収し質量を測定する)(f)
- ③ 本孔は仮孔用のドリルよりも径の大きいものを使用して、マイクロテンシオメータが挿入しやすい形状に手で丁寧に仕上げる。(削り出した土は全て回収し質量を測定する)
- ④ 孔あけ終了後に、マイクロテンシオメータと同じ形状の検査棒を挿入して密着具合を確認する。(g)

テンシオメータ挿入用の孔あけが終了した供試体は、写真-5(i)に示したように、水を張った容器で毛管飽和させる。毛管飽和の方法は、写真に示した方法の他に図-19に示した試験容器内で行う方法もある。密度が緩く崩れやすい供試体は、試験容器に設置してから毛管飽和をさせる。ただし、試験容器には透水性の低いセラミックディスクが取り付けられているので、写真-5(i)に示した方法に対して毛管飽和に長時間を要する。

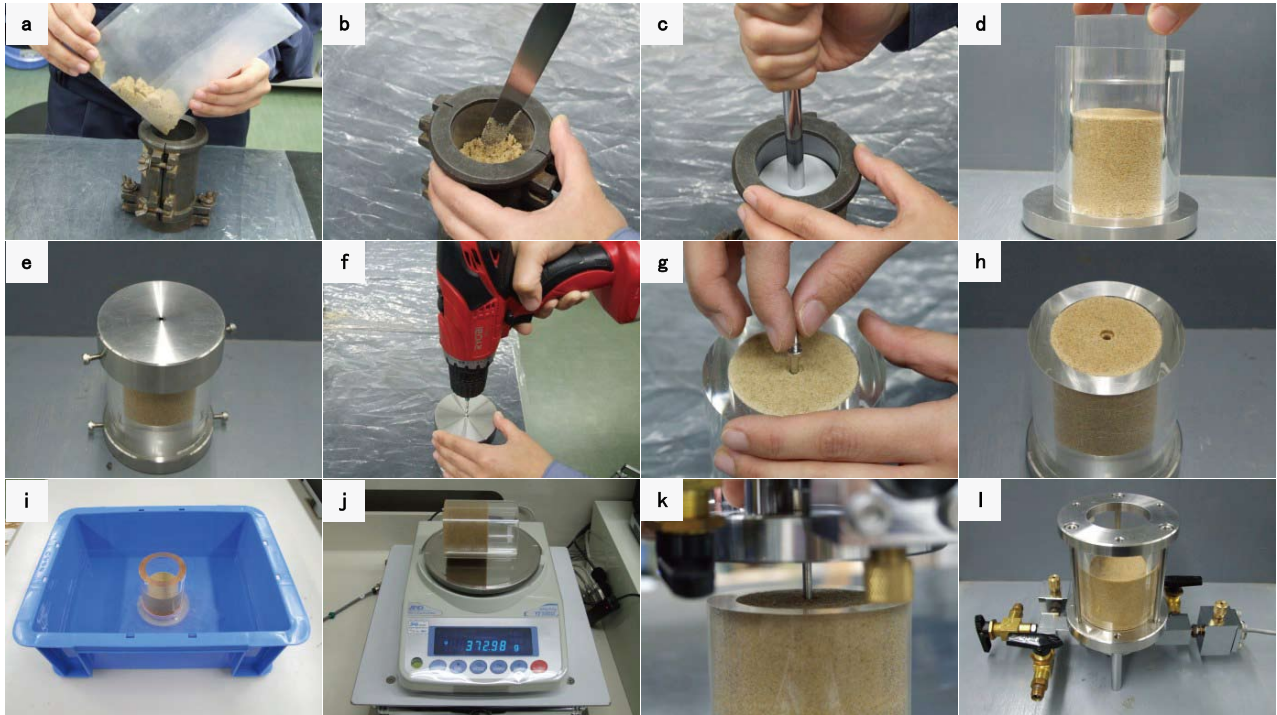
5.3 試験に使用した試料と試験条件

5.3.1 試験に使用した試料の物性

試験には、粒度構成が異なる豊浦砂と広島まさ土、DLクレーの3種類の材料を用いた。各試料の物理特性を表-4に示し、写真-6には乾燥状態の状況を示した。

表-4 試験に用いた試料の物理特性
Table 4 Physical properties of test samples

試験試料	土粒子の密度 (g/cm ³)	均等係数 U _c	平均粒径 D ₅₀ (mm)
豊浦砂	2.641	1.49	0.172
広島まさ土	2.614	46.1	0.484
DLクレー	2.651	4.58	0.0171



a: 二つ割りモールドに試料を投入 b: 投入した試料をヘラで均す c: 突き棒を使って試料を締め固める d: 供試体はアクリル円筒容器にセットしスペーサーディスクで固定する
 e: 孔あけフランジの組立 f: 電動ドリルで孔あけ g: テンシオメータの密着度を確認 h: 孔あけ後の状況
 i: 供試体の毛管飽和状況 j: 毛管飽和後の供試体質量の測定 k: 試験容器底板とアクリル円筒容器の組立 l: 設置完了状況

写真-5 供試体の作製から試験容器への設置手順

Photo. 5 Procedures from preparing a specimen to installing it in a pressure container

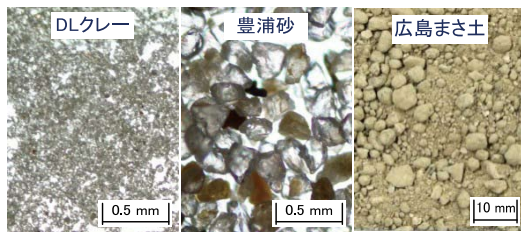


写真-6 試験に用いた試料の性状写真

Photo 6 Test samples

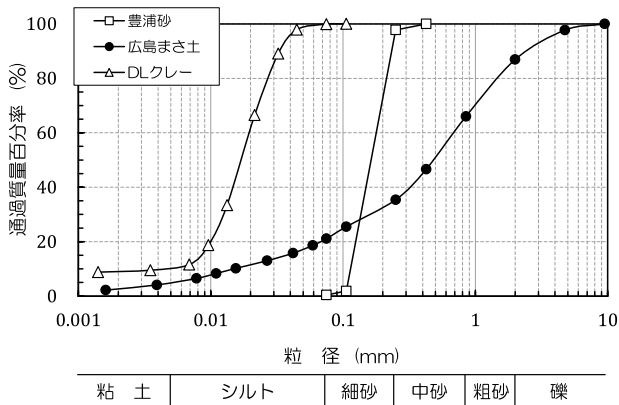


図-29 試験に用いた試料の粒径加積曲線

Fig. 29 Grain size distribution curves of test samples

図-29 に示したように、各試料の粒度特性は以下のようまとめられる。

- ① 豊浦砂は細砂主体の粒径分布が悪い材料で、均等係数 U_c は 1.49 と小さい。
- ② 広島まさ土は、粒径幅が広く粒度分布の良い材料で、細粒分を 20 % 程度含有し均等係数 U_c も 46.1 と大きい。
- ③ DL クレーは、シルト分主体の試料で粘土分は約 10 % 含んでいるものの粘性はほとんど無い試料である。均等係数 U_c は 4.58 と小さい。

5.3.2 供試体作製条件

供試体は、攪乱状態の試料を試験容器内に直径 5 cm、高さ 5 cm の寸法で締め固めによって作製した。作製条件を以下に示し、表-5 には一覧を示した。

- ① 豊浦砂は含水比 $w=5.0$ %、湿潤密度 $\rho_t=1.58$ g/cm^3 (相対密度 D_r は約 50 %) とした。
- ② 広島まさ土は、含水比 $w=21.6$ %、湿潤密度 $\rho_t=1.31$ g/cm^3 (原位置の表層土壌の密度) とした。
- ③ DL クレーは、含水比 $w=20.0$ %、湿潤密度 $\rho_t=1.80$ g/cm^3 (締め固め度 D_c は約 96 %) とした。

表-5 供試体の作製密度
Table 5 Density of specimens

試験試料	豊浦砂	広島まさ土	DLクレー
含水比 w (%)	5.0	21.6	20.0
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.58	1.31	1.80
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.50	1.08	1.50
間隙比	0.76	1.42	0.77
供試体の状態	相対密度 D_r は 50.4%	原位置の表層土壌の密度	締固め度 D_c は 96.2%



写真-7 締め固めによって作製した供試体の状況
Photo 7 Specimens prepared by compaction

写真-7には締め固めによって作製した供試体写真を示した。締め固めに当たっては、1層あたり1cmの厚さとして均一な供試体を作製した。

なお、DLクレーの供試体作製に当たっては、「不飽和土の一斉一軸・三軸圧縮試験の結果」¹⁷⁾(地盤工学会)の締固め試験結果を参考に、最適含水比、最大乾燥密度付近で供試体を作製した。図-30には一斉試験に参加した各機関の締固め試験結果を範囲で示し、供試体を作製した含水比と乾燥密度を●印で明示した。

5.3.3 試験条件

今回行った連続加圧法と段階加圧法による保水性試験条件を表-6にまとめて示した。

表-6 保水性試験条件
Table 6 Water retention test conditions

試験試料	豊浦砂		広島まさ土		DLクレー	
	段階加圧	連続加圧	段階加圧	連続加圧	段階加圧	連続加圧
保水性試験 加圧条件	段階加圧	連続加圧	段階加圧	連続加圧	段階加圧	連続加圧
加圧速度 (kPa / min)	—	0.1	—	0.1	—	0.1
加圧パターン (kPa)	1 → 2 → 3 → 4 → 8 → 15 → 8 → 4 → 3 → 2 → 1	0 ~ 50 ~ 1	0.5 → 1 → 2 → 4 → 8 → 30 → 98 → 30 → 8 → 4 → 2 → 1 → 0.5	0 ~ 90 ~ 1	2 → 4 → 8 → 15 → 30 → 60 → 98 → 60 → 30 → 15 → 8 → 4 → 2	0 ~ 95 ~ 1

連続加圧法の加圧速度は、各試料とも 0.1 kPa/min で統一した。加圧方法は三角形載荷として、脱水過程と吸水過程の水分特性曲線を求めた。

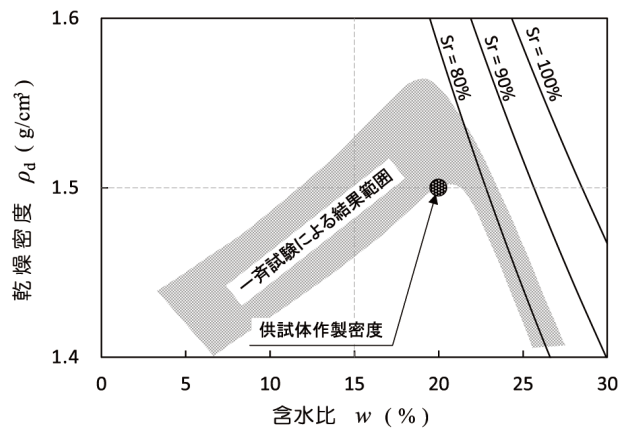


図-30 DLクレーの締固め曲線(文献17)の図-4を引用
Fig. 30 Compaction curve of DL clay¹⁷⁾

加圧圧力は、表-6に示したように保水力が小さい豊浦砂は50(kPa)を上限とし、細粒分の多いDLクレーは95(kPa)を上限とした。一方、広島まさ土については、豊浦砂よりも粗粒な材料ではあるが粒径幅が広く粒度分布の良い材料であり、細粒分も20%程度含有し保水力が高いと判断し、90(kPa)を上限とした。

段階加圧法の試験は、上述したような条件を考慮して各試料の上限空気圧を設定し、表-6に示したように加圧(脱水)過程で6~7段階、減圧(吸水)過程でも5~6段階の試験を行い、水分特性曲線を求めた。

6. 段階加圧法と連続加圧法による試験結果

図-31~図-33に豊浦砂と広島まさ土およびDLクレーの段階加圧法と連続加圧法によって得られた保水性試験結果を示した。以下に各試料の試験結果について述べる。

6.1 豊浦砂に対する試験結果

図-31 に豊浦砂に対する試験結果を示した。

図-31(a) には段階加圧法の空気圧 u_a 、供試体含水比 w の経時変化を示した。段階加圧法では、各圧力段階で排水量の終了を待って水分平衡状態としている。その結果、加圧板法による試験には約 44000 分 (約 31 日) を要した。

図-31(b) には連続加圧法の空気圧 u_a 、供試体中央に設置したテンシオメータで測定された間隙水圧 u_w 、供試体含水比 w ならびにサクシオン s の経時変化を示した。豊浦砂では、加圧過程・減圧過程ともに u_a と u_w の差が小さく、そのためサクシオン s が小さいことが特徴的である。連続加圧法の試験時間は約 2700 分 (45 時間) であった。

図-31(c) には連続加圧法と段階加圧法によって得られた水分特性曲線を重ねて示した。段階加圧法は、排水過程で 6 段階、吸水過程で 5 段階の異なるサクシオン領域の結果である。両者の水分特性曲線は、排水過程と吸水過程とも極めて良く一致しているが、含水比が 3 ~ 4 % 付近で両者の水分特性曲線には相違が見られる結果となっている。

連続加圧法では、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差が小さいことから、空気圧を 50 kPa まで加圧してもサクシオンは 7.1 kPa 以上に増加しなかった。一方、段階加圧法では、加えた空気圧によって排水の終了 (水分平衡) 時の空気圧をサクシオンとして定義しているためサクシオンは 15 kPa となっている。しかし、図-31(a) の含水比 w の経時変化を見ると、空気圧を 8 kPa から 15 kPa に増加させても変化する含水比は非常に小さく、微量の排水量から排水の終了 (水分平衡) を判断してサクシオンとしているところに段階加圧法の課題があると考えられる。

上述したような段階加圧法と連続加圧法の違いについては、7 節で検証する。

6.2 広島まさ土に対する試験結果

図-32 に広島まさ土に対する試験結果を示した。

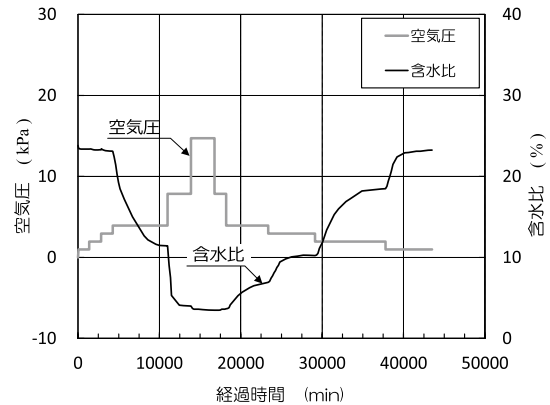
図-32(a) には段階加圧法の空気圧 u_a 、供試体含水比 w の経時変化を示した。広島まさ土の試験時間は、約 100000 分 (約 69 日) と豊浦砂よりも長い時間を要した。その理由としては、各圧力段階における水分平衡状態の確認に長時間を要し、特に減圧過程で吸水の終了を確認するのに長時間を要したことが挙げられる。

図-32(b) には連続加圧法の測定結果を示した。加圧して間もなく含水比には顕著な減少傾向が見られるが、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差はほとんどなく、サクシオンは小さいことが確認できる。しかし、含水比の減少傾向が小さくなる 270 分付近から、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差が徐々に大きくなるとともにサクシオンが増加する傾向を示す。連続加圧法の試験時間は、加圧過程、減圧過程と保持過程を含めて約 2500 分

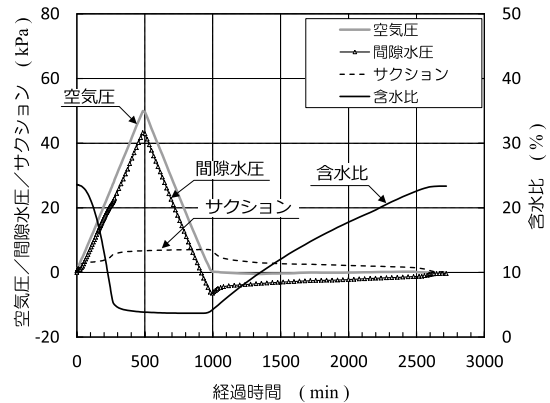
(約 42 時間) であった。

図-32(c) は、連続加圧法と段階加圧法によって得られた水分特性曲線を重ねて示したものである。

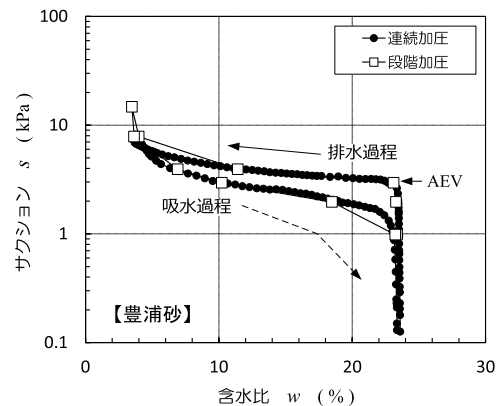
両者の水分特性曲線は全体的に良好な相関関係にあり、含水比が 22 % より低い領域からサクシオンが急激に増加する領域においても極めて良く一致することが確認できた。



(a) 段階加圧法の経時変化



(b) 連続加圧法の経時変化



(c) 水分特性曲線の重ね合せ

図-31 豊浦砂の保水性試験結果

Fig. 31 Water retention test results on Toyoura sand

6.3 DLクレーに対する試験結果

図-33 に DL クレーに対する試験結果を示した。

図-33(a) には段階加圧法の空気圧 u_a 、供試体含水比 w の経時変化を示した。試験は約 35000 分 (約 24

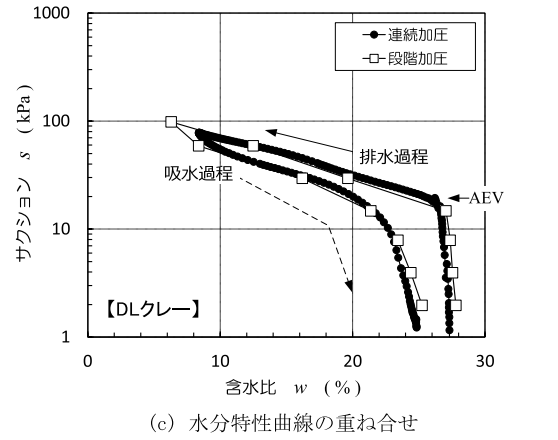
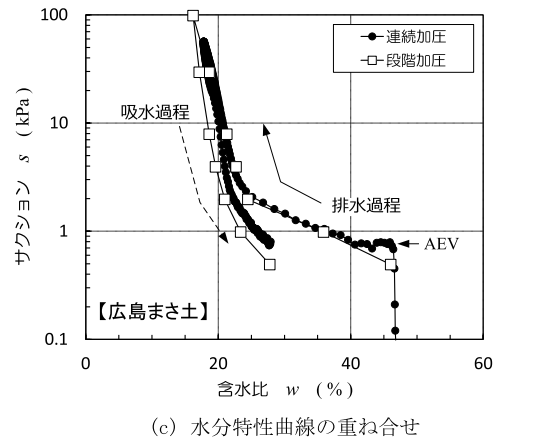
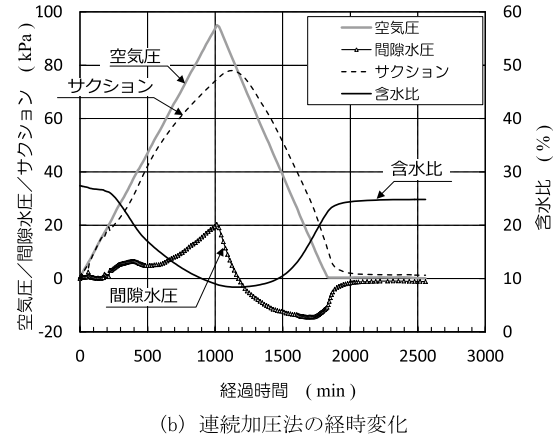
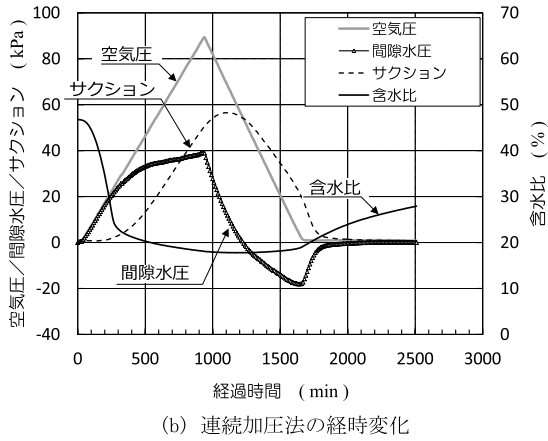
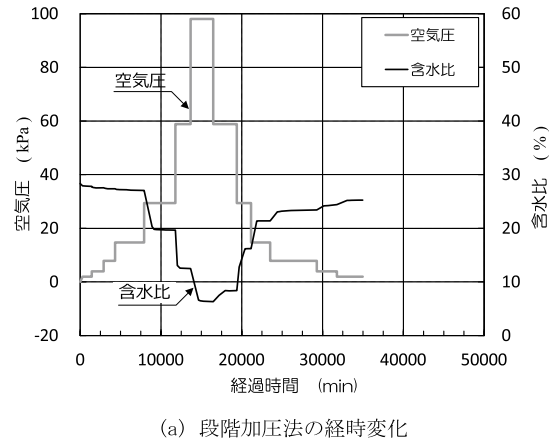
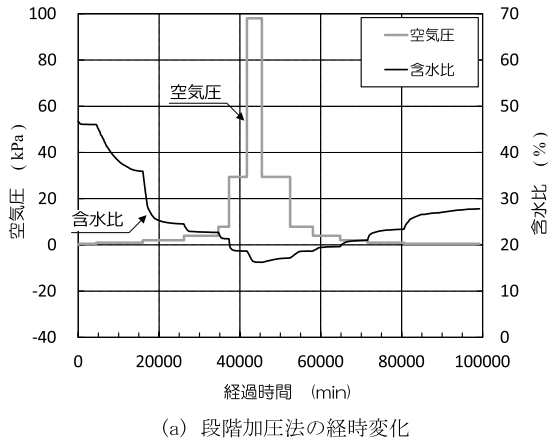


図-32 広島まさ土の保水性試験結果
Fig. 32 Water retention test results on Hiroshima decomposed granite soil

図-33 DL クレーの保水性試験結果
Fig. 33 Water retention test results on DL clay

日)で終了している。DL クレーは他の試料と比べて最も細粒な材料であるが、ほとんどがシルト分から構成されていることから排水や吸水は比較的短時間で終了している。

図-33(b)には連続加圧法の測定結果を示した。

DL クレーの結果においては、間隙水圧 u_w の挙動が試験開始直後より空気圧に追従することなく小さな値を示している。含水比の減少傾向も加圧直後は小さく、その後急激に減少しているが、豊浦砂や広島まさ土のような急激な減少傾向ではなく、緩やかに減少しているのが特徴的である。また、空気圧の増加に対す

る間隙水圧 u_w の発生量が小さいため、3 試料の中で最も高いサクション s を示している。

連続加圧法の試験時間は約 2600 分(約 43 時間)であった。

図-33(c)は、連続加圧法と段階加圧法によって得られた水分特性曲線を重ねて示したものである。両者の水分特性曲線は、全体的に良く一致している。

6.4 試験結果の考察

(1) 試験時間

段階加圧法による試験には、豊浦砂で約 31 日、広島

まさ土で約69日、DLクレーで約24日を要した。一方、連続加圧法による試験は、3試料とも2日程度で終了している。

段階加圧法は、各圧力段階で水分平衡状態を排水量から確認しているため、透水性の低い試料は必然的に試験時間が長期化する。また、透水性が高い試料でも、吸水過程では吸水の収束に長時間要することから試験時間が長くなる傾向にある。しかし、連続加圧法では、一定の速度で排水と吸水過程の試験が行われるため、段階加圧法と比較して大幅な試験時間の短縮が図れる。

(2) 空気侵入値 (AEV)

空気侵入値 (AEV) は、連続加圧法によって得られた水分特性曲線から Brooks and Corey²⁴⁾ による方法を参考に図-34 に示す方法で求めた。

その結果、豊浦砂の空気侵入値は3.08 kPa、広島まさ土の空気侵入値は0.68 kPa、DLクレーの空気侵入値は18.59 kPaであった。

各試料の空気侵入値は、図-35 に重ねて示したように広島まさ土、豊浦砂、DLクレーの順に高くなっていく。豊浦砂よりも細粒分の含有が多い広島まさ土の空気侵入値が小さい理由としては、平均粒径 D_{50} が他の試料に比べて大きいことと、供試体が緩い状態であったことに起因していると考えられる。

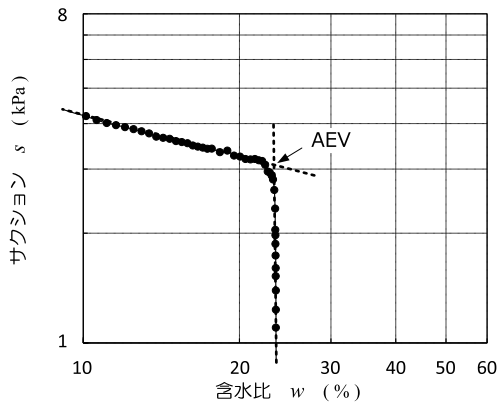


図-34 空気侵入値 (AEV) の算出方法
Fig. 34 Method of calculating an air entry value

(3) 水分特性曲線の形状

豊浦砂とDLクレーの水分特性曲線の形状は類似しているが、DLクレーは豊浦砂よりも全体に高いサクシオンを示す。両者の粒径を比較すると、 D_{10} (有効径) に大きな違いが見られ、豊浦砂の D_{10} が0.12 mm であるのに対しDLクレーの D_{10} は0.005 mm と細粒である。これより、式 (4) に示したように、 D_{10} (有効径) が試料のサクシオンに影響を与えていることが推察される。

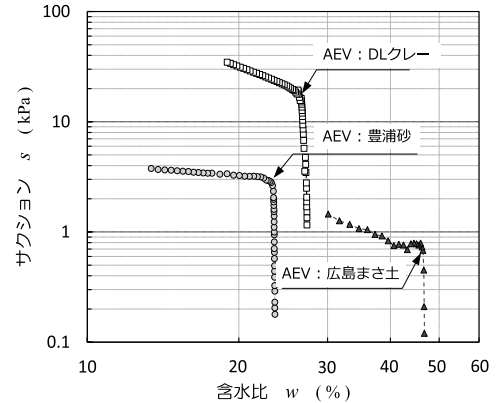


図-35 空気侵入値 (AEV) の算出結果
Fig. 35 Results of air entry value calculation

また、図-36 に示すように広島まさ土の水分特性曲線は豊浦砂やDLクレーの傾向とは異なり、含水比が高い (約23%) 値から懸垂水不飽和領域の傾向を示している。この要因としては、広島まさ土の粒度構成や供試体密度の条件のみでは説明できないことから、土粒子の状況を顕微鏡によって観察した。その結果、写真-8 に示したように、広島まさ土の土粒子表面には空隙や亀裂が多く存在していることが確認できた。その空隙や亀裂内に含まれている水分が、高いサクシオンを負荷しても排水されずに粒子内に残り、含水比が高い状態を維持していると考えられる。

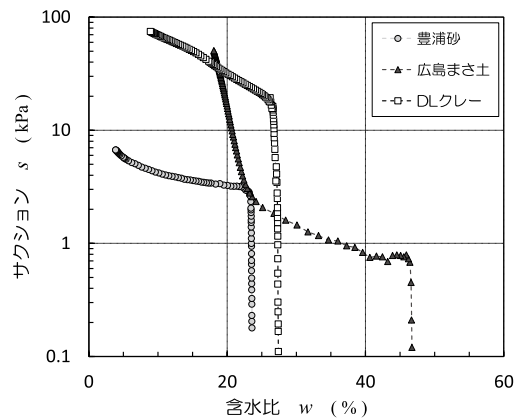


図-36 保水性試験結果
Fig. 36 Water retention test results

(4) 加圧速度

連続加圧法による試験では加圧・減圧速度を0.1 kPa/min としたが、連続加圧法と段階加圧法によって得られた水分特性曲線を比較した結果、大きな違いは確認できなかったことから妥当な速度であると評価できる。

なお、加圧速度が水分特性曲線に与える影響性については7節で検証する。

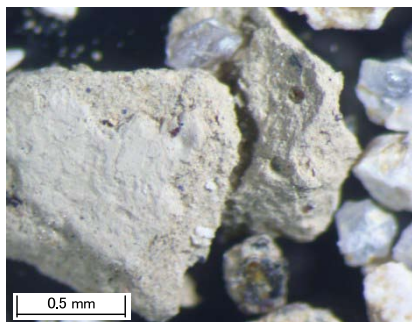


写真-8 広島まさ土の顕微鏡写真

Photo 8 Micrograph of Hiroshima decomposed granite soil

(5) 加圧・減圧過程の間隙水圧の挙動

加圧過程では空気圧 u_a の増加に伴い間隙水圧 u_w も上昇する傾向を示し、減圧過程では間隙水圧 u_w も減少する傾向を示す。しかし、間隙水圧の挙動には試料による違いが見られる。

広島まさ土と DL クレーについては、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の挙動は、上述したような関係にあるが、両試料ともに減圧直後から吸水は見られず、間隙水圧 u_w が負値を示したあたりから吸水に転じている。吸水の傾向は、空気圧が 0 kPa に達したあたりから顕著になっていることが確認できる。

一方、豊浦砂の間隙水圧の挙動は、6.1 節でも述べたように加圧過程・減圧過程ともに空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差が小さく、そのためサククション s は全体に小さな値となっているのが特徴的である。吸水挙動は、空気圧が 0 kPa に達したあたりから顕著に吸水し、長時間継続していることが確認できる。

これらを考慮すると、段階加圧法と同様に連続加圧法においても吸水過程の計測には十分な試験時間をかける必要があると考えられる。

(6) ヒステリシス

排水過程と吸水過程の水分特性曲線にはヒステリシス現象が見られ、吸水過程の曲線は排水過程の曲線よりも低いサククションを示す。

ヒステリシスは、豊浦砂に比べて広島まさ土や DL クレーの結果において顕著に表れている。豊浦砂のように均等係数 U_c の小さな単一粒径の材料はヒステリシスの影響が小さく、細粒な DL クレーや粒径幅の広い広島まさ土ではヒステリシスの影響が大きいと考えられる。

7. 連続加圧法による保水性試験の妥当性の検証

7.1 豊浦砂の高サククション領域における水分特性曲線の妥当性の検証

豊浦砂の連続加圧法と段階加圧法による水分特性曲線には、サククションの高い領域において相違が確認された。その要因としてサククション s の定義方法の違いが考えられた。

連続加圧法ではサククション s は、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差で定義しているが、段階加圧法では空気圧 $u_a = s$ として定義している。以下では、このサククション s の定義の違いが、水分特性曲線に与える影響を検討し、連続加圧法の妥当性の検証を行った。

7.1.1 検証方法と結果

検証のための試験は以下の方法で行った。

- ① 試験容器は図-19 に示した連続加圧法用の試験容器を使用した。
- ② 供試体の作製条件（含水比、密度）は、表-5 に示した条件とした。
- ③ 供試体は試験容器内で毛管飽和させた。
- ④ 空気圧の加圧・減圧方法は、加圧板法に準じて段階荷重とした。空気圧の加圧パターンは排水過程で 1 段階、吸水過程でも 1 段階として、各段階で排水量と吸水量を計測した。
- ⑤ 加圧過程と減圧過程では、連続加圧法で使用しているマイクロテンシオメータによって供試体中央の間隙水圧も同時に測定し、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差から、排水（吸水）過程のサククションを連続的に算出して水分特性曲線を求めた。
- ⑥ 空気圧の負荷は、加圧板法に準じると短時間（瞬間荷重に近い条件）で負荷することになるが、ここでは約 10 分間で所定の空気圧となるように 5 kPa/min の一定速度で加圧・減圧を行った。
- ⑦ 加圧後（吸水過程は減圧後）は、所定の空気圧を保持し、排水（吸水）の終了を確認した。

図-37 には豊浦砂に対する試験結果を、図-38 には広島まさ土に対する試験結果を示した。

(1) 豊浦砂

図-37(a) には空気圧の加圧パターンを示した。また、同図には間隙水圧 u_w の挙動を破線で併記した。

図に示したように、空気圧は排水過程で 0 ~ 90 (kPa) の空気圧を 1 段階、吸水過程でも 50 ~ 0 (kPa) の空気圧を 1 段階として負荷した。その時の排水量と吸水量の関係から図-37(b) のような含水比 w の経時変化を求めた。

図-37(b) に示したように、含水比 w の経時変化から、排水過程と吸水過程の傾向は大きく異なり、同じ圧力変化を与えた条件においても、排水過程では比較的短時間で排水は終了し水分平衡状態に達していることがわかる。一方、減圧過程においては、吸水に長時間要することが明らかとなった。

図-37(c) には、排水（吸水）の進行度合いを、排水度（吸水過程においては吸水度）として整理して示した。ここでは、排水（吸水）過程における水分平衡状態までの含水比の変化量を w_f とし、ある時点における含水比の変化量 Δw との比 ($\Delta w/w_f$) を、便宜的に排

水度 (吸水度) としている。

図-37(d) には、加圧板法の整理方法に準じて求めたサクシオン s と含水比 w の関係と、連続加圧法の整理方法に準じて求めたサクシオン s と含水比 w の関係を示した。前者は、複数段階の計測を行って求められるものであるが、ここでは、加圧した空気圧 u_a (50 kPa) をサクシオン s ($s = u_a$) として、排水度 0, 50, 75, 90, 100 % ときの含水比 w を●印でプロットした。また、加圧と同様に減圧後の吸水過程の含水比 w は、吸水度として△印でプロットした。一方、後者は○印でプロットした。

連続加圧法と段階加圧法の結果は、理想的には段階加圧法の排水度 100 % の点に、連続加圧法の曲線が接するはずであるが、この試験結果では、これらは接していない結果となった。逆に、両者の関係は、図-31(c) に示した結果よりも差が大きくなっていることがわかる。

(2) 広島まさ土

図-38(a) には空気圧の加圧パターンを示した。また、同図には間隙水圧 u_w の挙動を破線で併記した。図に示したように、空気圧は排水過程で 0 ~ 45 (kPa) の空気圧を 1 段階、吸水過程でも 45 ~ 0 (kPa) の空気圧を 1 段階として負荷した。その時の排水量と吸水量の関係から図-38(b) に示す含水比 w の経時変化を求めた。なお、空気圧を 45 kPa とした理由は、豊浦砂よりも細粒分が多かったことと、緩い密度状態であったために、高い空気圧を加圧することで供試体を乱す危険があったためである。含水比 w の経時変化は排水過程と吸水過程で大きく傾向が異なり、減圧過程では吸水に長時間要することと、水分平衡状態を判断することが難しいことがわかる。このような現象は、細粒分の含有量が多くなるとさらに顕著になると考えられる。

図-38(c) には、排水 (吸水) の進行度合いを、排水度 (吸水過程においては吸水度) として整理して示した。

図-38(d) には、豊浦砂の結果と同様に加圧板法の整理方法に準じて求めたサクシオン s と含水比 w の関係を●印と△印で示し、連続加圧法の整理方法に準じて求めたサクシオン s と含水比 w の関係を○印で示した。

広島まさ土においては、段階加圧法の排水度 100 % の点に連続加圧法の曲線が理想的に接することが確認できた。

7.1.2 検証結果の評価

(1) サクシオン s の定義の違いが水分特性曲線に与える影響

連続加圧法の結果は、理想的には段階加圧法の排水度 (吸水度) 100 % で接するはずである。しかし、上述したように豊浦砂の結果においては相違が見られ

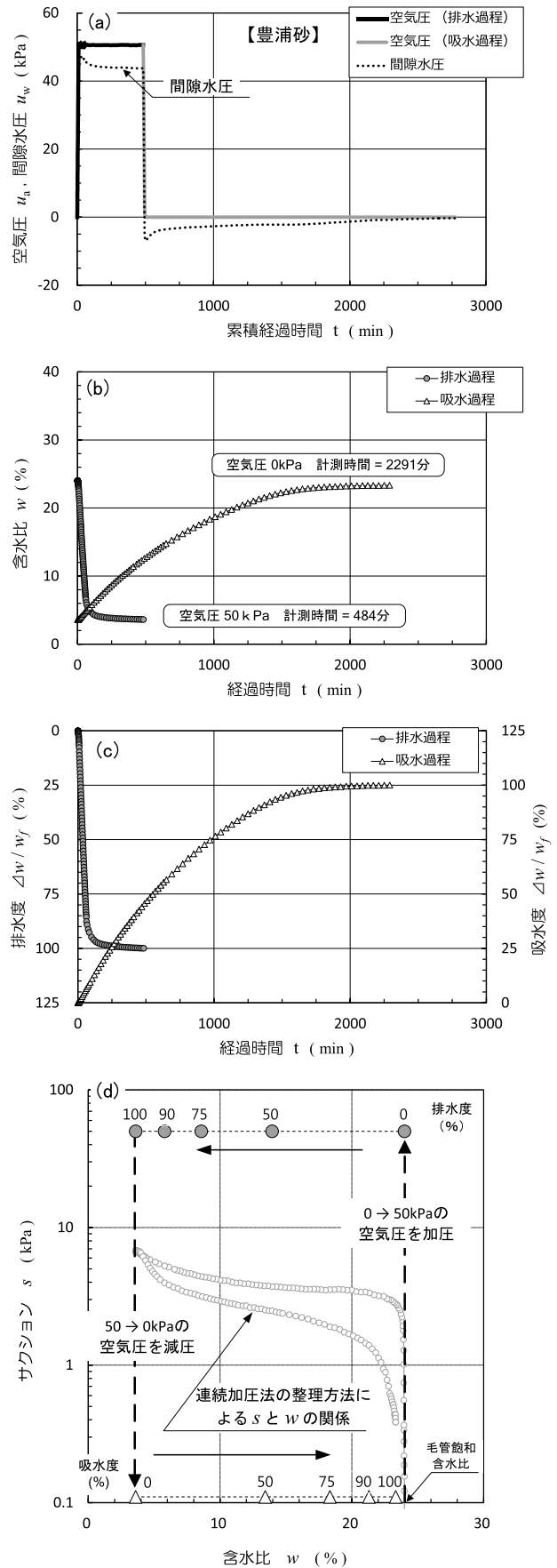


図-37 連続加圧法用試験装置を用いた段階載荷試験結果 (豊浦砂)
 Fig. 37 Incremental loading test results using continuous pressurized test apparatus (Toyoura sand)

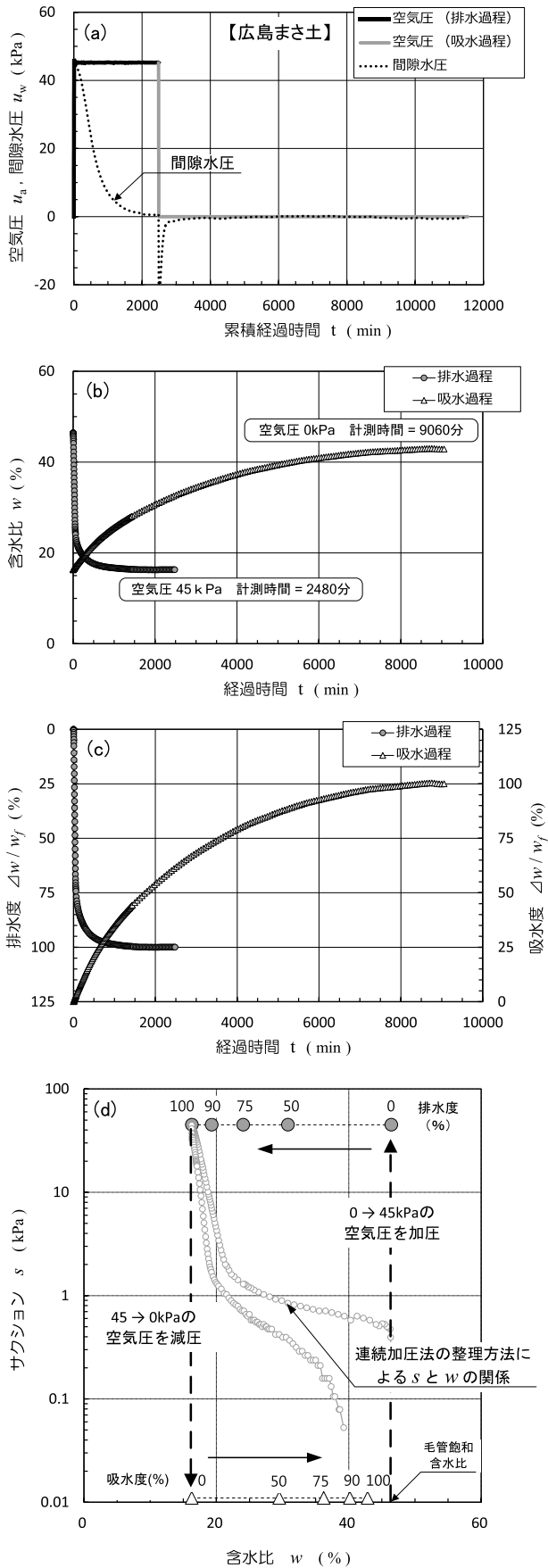


図-38 連続加圧法用試験装置を用いた段階荷試験結果 (広島まさ土)

Fig. 38 Incremental loading test results using continuous pressurized test apparatus (Hiroshima decomposed granite soil)

た。

段階加圧法では、空気圧 $u_a(p)$ から、サクシオン s を以下の式で定義している。

$$s = u_a \tag{10}$$

一方、連続加圧法では、空気圧 u_a と供試体中央で測定される間隙水圧 u_w から、(8)式を用いてサクシオン s を $s = u_a - u_w$ で定義している。

試験方法やサクシオン s の定義の違いはあるものの、広島まさ土やDLクレーでは連続加圧法と段階加圧法の水分特性曲線は良好な相関性を示した。

特に、図-38(d)に示した広島まさ土の結果においては、排水度100%の点に、マイクロテンシオメータで計測した供試体中央の間隙水圧 u_w から求めた水分特性曲線が接している。ここで、段階加圧法におけるサクシオン s は(10)式から45.0 kPa、供試体中央の間隙水圧 u_w から求めたサクシオン s は(8)式から44.5 kPaとなり、両者はほぼ一致している。

したがって、サクシオン s の定義の違いが水分特性曲線に与える影響性は小さいと考えられる。

(2) 豊浦砂の高サクシオン領域における水分特性

豊浦砂の水分特性曲線(図-31(c)ならびに図-37(d)の○印)を図-8に示した三つの不飽和形態のうち、封入不飽和状態と過渡的不飽和状態は確認できるが懸垂水不飽和状態は明瞭に確認できない。

一方、広島まさ土の水分特性曲線(図-32(c)ならびに図-38(d)の○印)では、三つの不飽和状態を確認することができる。

懸垂水不飽和状態とは、間隙内の水が十分に排水され、水はわずかに土粒子と土粒子の接点の周りにメニスカスを形成して、その中に保持されている状態と説明されている。その結果、サクシオンの増加割合に対して排水量が徐々に減少することになると考えられる。

しかし、単一粒径の砂や礫質土などの大きな間隙を有する試料は、比較的小さなサクシオンで間隙水は排水され、より高いサクシオン状態では土粒子と土粒子の接点の周りにメニスカスを形成することができず、土粒子表面に吸着(表面保水、図-4参照)するような形で間隙水が保持されていると考えられている。

そのため、豊浦砂のように細粒の砂であっても単一粒径の材料であれば、土中水の減少とともにメニスカスによって保持される水分量がなくなり、表面保水状態となっていることが考えられる。

以上より、図-31(c)に示した豊浦砂の高サクシオン領域における水分特性曲線については、連続加圧法による結果のほうが間隙内の水分特性を再現しており、妥当な結果であると考えられる。

7.2 連続加圧法における加圧速度が水分特性曲線に与える影響の検証

連続加圧法における空気圧 u_a の加圧速度が水分特性曲線に与える影響について検証した。ここでは、豊浦砂と広島まさ土および DL クレーを対象とした。

検証結果は、図-39～図-48 に示した。

7.2.1 加圧速度を変えた場合の間隙水圧 u_w 、含水比 w の経時変化の比較

(1) 豊浦砂

図-39(a) は豊浦砂に対して空気圧 u_a を 50 kPa まで与えたときの経時変化で、加圧速度は 0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/min の 3 種類とした。試験終了までに要した時間は 0.01 kPa/min で 5000 分 (約 4 日), 0.1 kPa/min で 500 分, 3.0 kPa/min で約 17 分であった。

図-39(b) には連続加圧中の間隙水圧 u_w の経時変化を示した。時間軸はそれぞれ加圧速度が異なるので正規化時間で示している (ここでは、加圧終了時間 t_f と、ある時点における時間 t の比 (t/t_f) を便宜的に正規化時間とした)。間隙水圧 u_w の変化傾向は、速度差による顕著な違いは見られない結果となっている。

図-39(c) には連続加圧中の排水量から求めた含水比 w の経時変化を示した。時間軸は正規化時間で示している。含水比 w については速度差による顕著な違いが認められ、加圧速度が 0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min の条件では加圧中に排水の終了が現れていることがわかる。しかし、3.0 kPa/min の速い速度条件では含水比の低下が見られないことから、ほとんど排水が進行していないことが読み取れる。

(2) 広島まさ土

図-40(a) は広島まさ土に対して空気圧 u_a を 90 kPa まで与えたときの経時変化で、加圧速度は 0.003 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/min の 3 種類とした。試験終了までに要する時間は 0.003 kPa/min で 30000 分 (約 21 日), 0.1 kPa/min で 900 分, 3.0 kPa/min で 30 分であった。

図-40(b) には連続加圧中の間隙水圧 u_w の経時変化を正規化時間で示している。間隙水圧 u_w の変化傾向には速度差による顕著な違いが見られ、加圧速度が 0.003 kPa/min の場合はほとんど間隙水圧 u_w が発生していない結果が得られた。逆に、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合には、空気圧 u_a とほぼ等しい間隙水圧 u_w が発生している結果となった。これより、加圧速度と間隙水圧 u_w の発生傾向には加圧速度による影響が顕著に表れることがわかった。

図-40(c) には連続加圧中の排水量から求めた含水比 w の経時変化を示した。時間軸は正規化時間で示している。加圧速度が 0.003 kPa/min と 0.1 kPa/min の場合の含水比 w の経時変化傾向には、豊浦砂と同様に速度差による顕著な違いが認められ、速度が遅い条

件では排水の終了が早く表れていることがわかる。一方、加圧速度が 3.0 kPa/min の供試体は、毛管飽和過程を省き試料採取時の含水比から空気圧を加圧しており、試験開始時の含水比は他の速度条件の供試体よりも低い値にあるが、加圧中の含水比の低下は認められない結果となっている。

(3) DL クレー

図-41(a) は DL クレーに対して空気圧 u_a を 95 kPa まで与えたときの経時変化で、加圧速度は 0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/min の 3 種類とした。試験終了までに要する時間は 0.01 kPa/min で 9500 分 (約 7 日), 0.1 kPa/min で 950 分, 3.0 kPa/min で約 32 分であった。

図-41(b) には連続加圧中の間隙水圧 u_w の経時変化を正規化時間で示している。間隙水圧 u_w の変化傾向には、速度差による顕著な違いが見られ、加圧速度が 0.01 kPa/min の場合の間隙水圧 u_w の発生は非常に小さい結果となっている。また、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合でも空気圧 u_a とは明瞭な差が認められ、豊浦砂や広島まさ土とは異なる挙動を示している。

図-41(c) には連続加圧中の排水量から求めた含水比 w の経時変化を示した。時間軸は正規化時間で示している。加圧速度が 0.01 kPa/min と 0.1 kPa/min の場合の含水比 w の経時変化傾向は、比較的近似しているようにみとれる。しかし、含水比 w の経時変化からはいずれも明瞭な水分平衡状態が確認し難い結果となっている。

また、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合の含水比の低下には遅れが見られ、加圧速度の違いによる影響を受けていることがわかった。

7.2.2 加圧速度を変えて得られた水分特性曲線の比較

(1) 豊浦砂

図-42 には加圧速度を変えて得られた豊浦砂の水分特性曲線を示した。

空気圧 u_a は 50 kPa まで与えているが、図-39(b) に示したように空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差が非常に小さいことから、サクシオンは最大でも約 8 kPa と小さい。また、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合の水分特性曲線が途中で切れているような関係で得られている。

サクシオンが小さい要因は粒径や粒度構成によると考えられ、また、水分特性曲線が途切れている原因は加圧速度が速いことで十分な排水が行われていないことによると考えられる。

一方、加圧速度が 0.01 kPa/min と 0.1 kPa/min の場合の水分特性曲線には顕著な違いは見られない結果となっている。

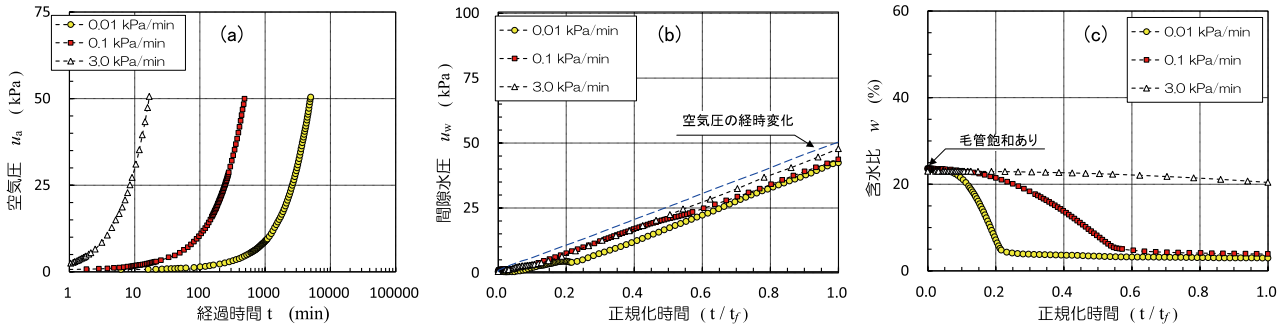


図-39 加圧速度を変えた豊浦砂の経時変化図
 Fig. 39 Temporal change of Toyoura sand with changes in pressurization rate

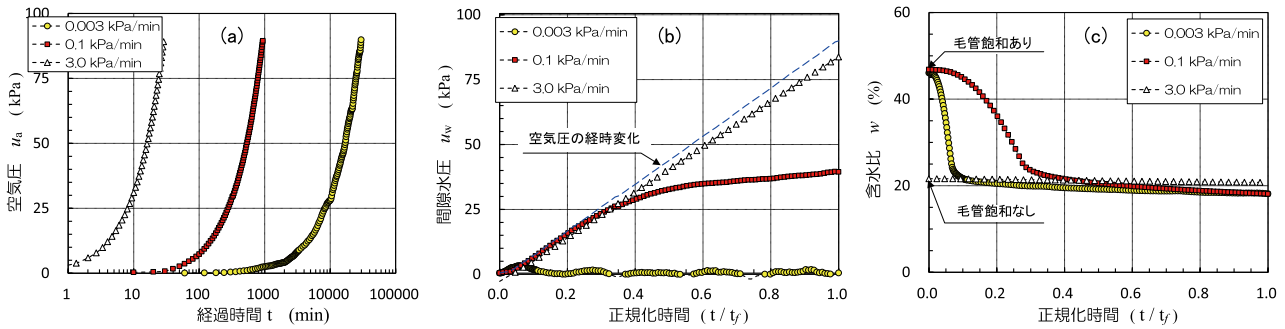


図-40 加圧速度を変えた広島まさ土の経時変化図
 Fig. 40 Temporal change of Hiroshima decomposed granite soil with changes in pressurization rate

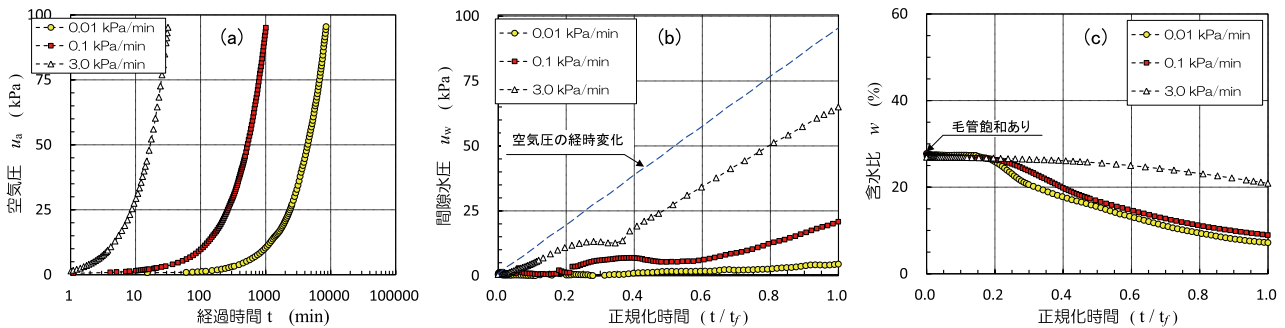


図-41 加圧速度を変えたDLクレ어의経時変化図
 Fig. 41 Temporal change of DL clay with changes in pressurization rate

(2) 広島まさ土

図-43には加圧速度を変えて得られた広島まさ土の水分特性曲線を示した。

空気圧 u_a は 90 kPa まで与えているが、加圧速度が 0.003 kPa/min の場合には約 90 kPa のサクシオンが求められている。しかし、加圧速度が 0.1 kPa/min の場合には約 50 kPa のサクシオンで計測が止まっている。この要因としては、図-40(b), (c) に示した関係から、加圧過程で間隙水圧 u_w が残留し排水が十分でなかったことが影響していると考えられる。また、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合にはほとんど排水されていないことから、豊浦砂と同様に含水比がほとんど変化しない結果となっている。

(3) DLクレ어

図-44には加圧速度を変えて得られたDLクレ어의水分特性曲線を示した。

空気圧 u_a は 95 kPa まで与えているが、加圧速度が 0.01 kPa/min の場合には約 95 kPa のサクシオンが求められている。加圧速度が 0.1 kPa/min の場合でも約 80 kPa のサクシオンが求められている。これより、DLクレ어は細粒な材料ではあるが比較的排水性の高い材料であると推察され、排水の遅れによる影響は小さいと判断される。一方、加圧速度が 3.0 kPa/min の場合には、豊浦砂と同様に水分特性曲線が正しく描かれない結果となった。

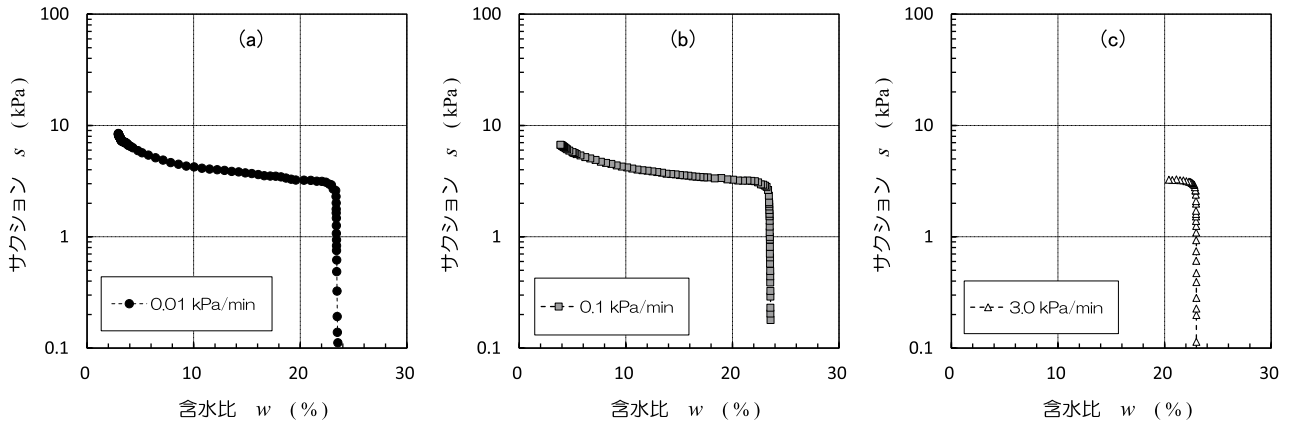


図-42 加圧速度を変えて得られた豊浦砂の水分特性曲線

Fig. 42 Water retention curves of Toyoura sand obtained at different pressurization rate

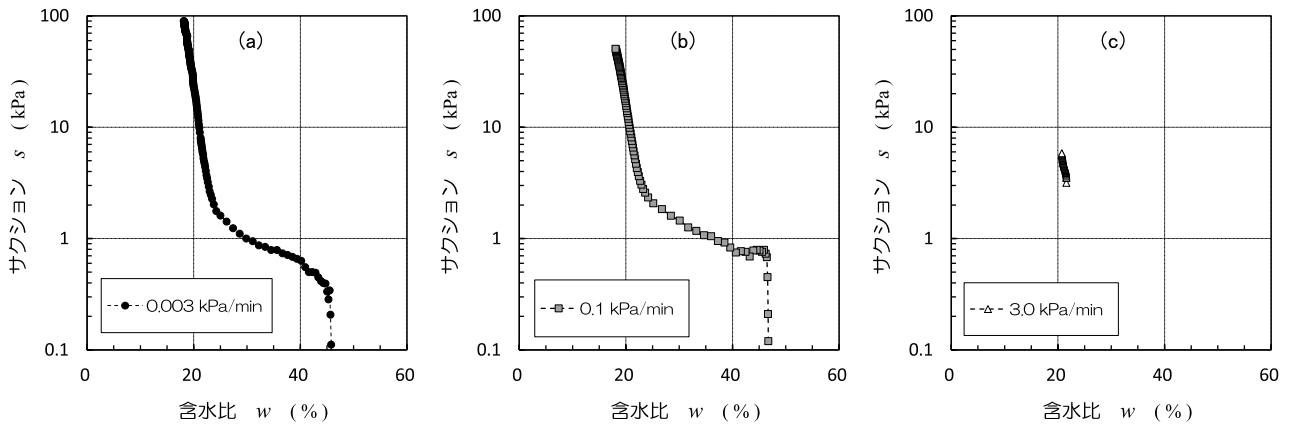


図-43 加圧速度を変えて得られた広島まき土の水分特性曲線

Fig. 43 Water retention curves of Hiroshima decomposed granite soil obtained at different pressurization rate

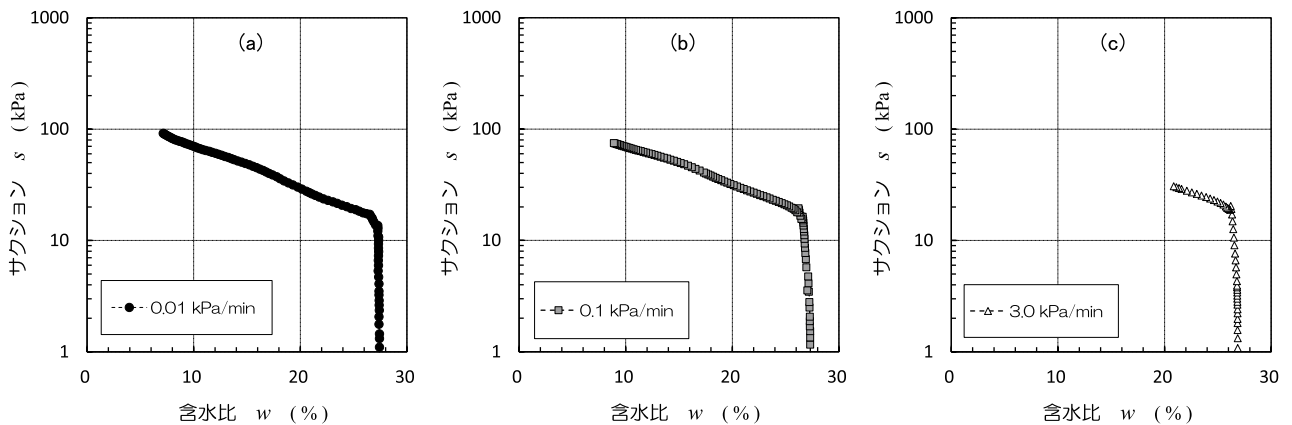


図-44 加圧速度を変えて得られたDLクレーの水分特性曲線

Fig. 44 Water retention curves of DL clay obtained at different pressurization rate

7.2.3 圧力保持過程を追加した試験による水分特性曲線の補完

連続加圧法で加圧速度を変えた試験を行った結果、加圧速度が速いと十分な間隙水圧 u_w や間隙水の消散が行われないうことによる試験上の課題が明らかになった。

ここでは、適切な加圧方法の検討を目的として、加圧過程のみで十分な結果が得られなかった加圧速度 3.0 kPa/min の場合について、加圧終了後に圧力を保持させることによって水分特性曲線を補完する方法を試みた。以下では、その結果について述べる。

(1) 豊浦砂

図-45には豊浦砂に対して加圧速度 3 kPa/min で 50 kPa まで加圧した後、圧力保持過程を追加した試験結果を示した。ここでは 353 分間 (約 6 時間) 圧力を保持させた。

図-45(a), (b)には、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の経時変化を示した。時間軸は各試料で空気圧の保持時間が異なっているため、上述したように正規化時間で示している。豊浦砂の加圧過程で見られる特徴として、空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の差が小さいことが挙げられるが、圧力保持過程の経時変化でも間隙水圧 u_w の減少は小さく、発生するサクシオン s ($s = u_a - u_w$) も小さいことが確認できた。

図-45(c)には含水比 w の経時変化を示した。含水比 w は空気圧 u_a を保持させた直後から減少する傾向が確認できる。また、間隙水圧 u_w では明瞭な収束傾向を確認できなかったが、含水比の減少傾向より、正規化時間で 0.2 付近 (圧力保持後、約 71 分程度) で収束している状況が明瞭に確認できることがわかった。

図-45(d)には、水分特性曲線を示した。圧力保持過程で排水が十分に行われたことによって、目的とする水分特性曲線が求められることが明らかとなった。

(2) 広島まさ土

図-46には広島まさ土に対して加圧速度 3 kPa/min で 90 kPa まで加圧した後、圧力保持過程を追加した試験結果を示した。ここでは約 4000 分間 (約 67 時間) 圧力を保持させた。

図-46(a), (b)には空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の経時変化を示した。間隙水圧 u_w は、空気圧 u_a を保持させた直後から急激に消散し、正規化時間で 0.5 付近 (約 2000 分程度) で収束している状況が確認できる。

図-46(d)には水分特性曲線を示した。なお、広島まさ土の試料については、毛管飽和過程を省き、試料採取時の含水比から空気圧を加圧しているため、水分特性曲線は部分的なものとなっている。それでも、圧力保持過程で間隙水圧 u_w の消散と排水が十分に行われたことによって、目的とする水分特性曲線が求められることが明らかとなった。

(3) DL クレー

図-47には DL クレーに対して加圧速度 3 kPa/min で 95 kPa まで加圧した後、圧力保持過程を追加した試験結果を示した。ここでは 647 分間 (約 11 時間) 圧力を保持させた。

図-47(a), (b)には空気圧 u_a と間隙水圧 u_w の経時変化を示した。間隙水圧 u_w は空気圧 u_a を保持させた直後から消散しているが、消散傾向は豊浦砂や広島まさ土とは異なり、明瞭な収束傾向が表れない結果となった。

図-47(c)には含水比 w の経時変化を示した。含水比 w は加圧中から低下し、空気圧 u_a を保持させた直

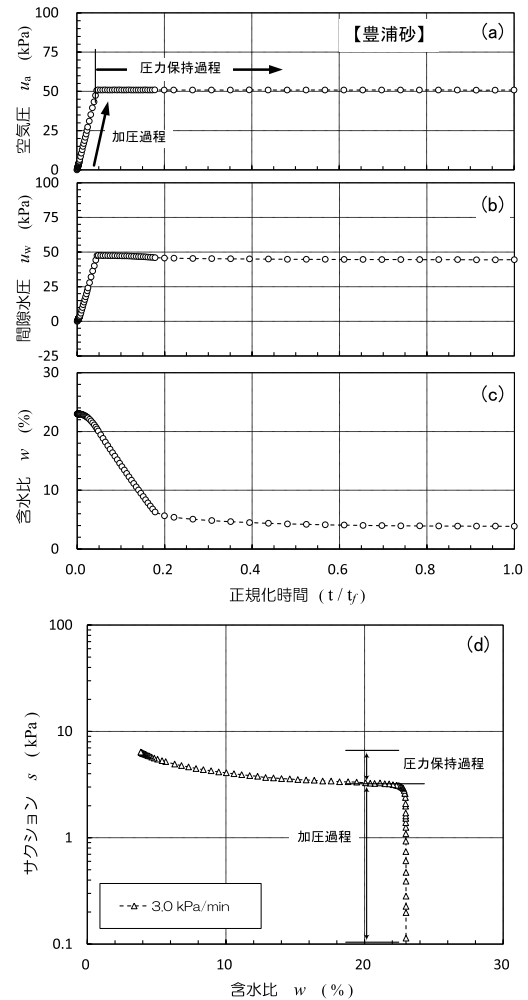


図-45 圧力保持過程を追加した保水性試験結果 (豊浦砂)

Fig. 45 Water retention test results with additional pressure holding process (Toyoura sand)

後からその減少傾向が弱まるところが他の試料と異なっている。また、明瞭な収束傾向を示さないところは、上述した間隙水圧の消散傾向と同様である。

図-47(d)には水分特性曲線を示した。圧力保持過程で水分平衡状態が確認されていない状況においても、目的とする水分特性曲線が描かれ、加圧している空気圧 u_a (95 kPa) に対して約 85 kPa のサクシオン s ($s = u_a - u_w$) が求められている。

7.2.4 加圧速度の影響についての検証結果

連続加圧法における空気圧 u_a の加圧速度が水分特性曲線に与える影響について検証するため、上述したように豊浦砂と広島まさ土および DL クレーを対象として、豊浦砂と DL クレーについては 0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/min の加圧速度で、広島まさ土に対しては 0.003 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/min の加圧速度で実験を行った。

3種類の加圧速度で求められた水分特性曲線は、各試料ごとに一括して図-48に示した。

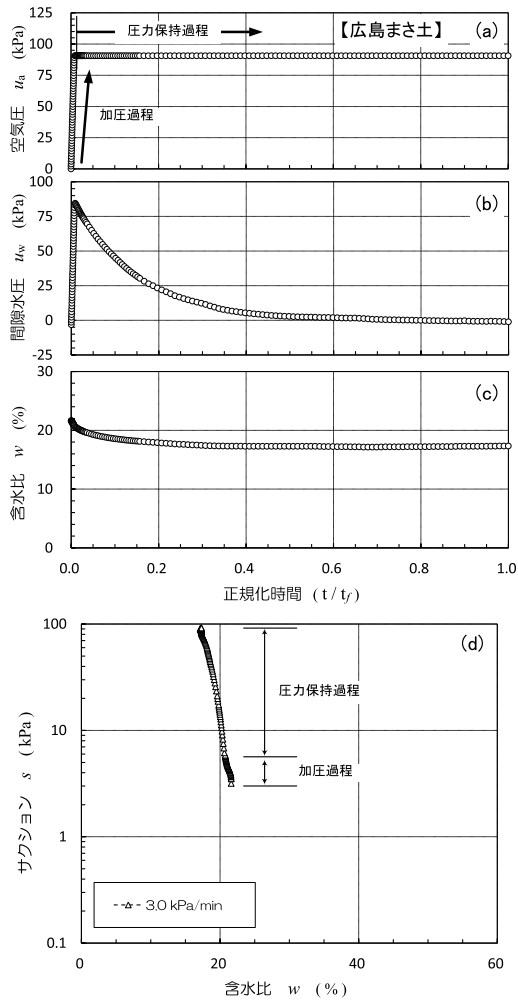


図-46 圧力保持過程を追加した保水性試験結果（広島まさ土）

Fig.46 Water retention test results with additional pressure holding process (Hiroshima decomposed granite soil)

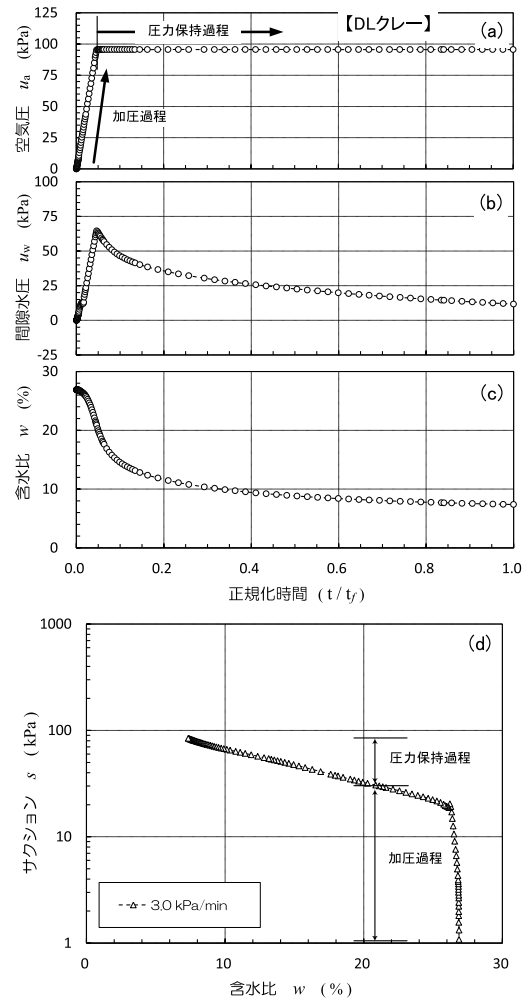


図-47 圧力保持過程を追加した保水性試験結果（DL クレー）

Fig. 47 Water retention test results with additional pressure holding process (DL clay)

(1) 豊浦砂

図-48(a)には0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/minの3種類の加圧速度により得られた水分特性曲線を重ねて示した。3 kPa/minの試験結果については圧力保持過程を追加した結果を合わせて示している。3種類の速度による水分特性曲線は、封入不飽和領域から過渡的不飽和領域においても良く一致していることが確認できる。

(2) 広島まさ土

図-48(b)には0.003 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/minの3種類の加圧速度により得られた水分特性曲線を重ねて示した。上述したように、3 kPa/minの試験結果については毛管飽和過程を省き、試料採取時の含水比から空気圧を加圧しているため、含水比で21.6%からの水分特性曲線となっている。

3種類の速度による水分特性曲線は、封入不飽和から過渡的不飽和ならびに懸垂水不飽和領域においても比較的良く一致していることが確認できる。一部、低サクシオン領域では水分特性曲線の形状に若干の違い

が見られるが、工学的には十分な精度を有しているものと考えられる。

(3) DL クレー

図-48(c)には0.01 kPa/min, 0.1 kPa/min, 3.0 kPa/minの3種類の加圧速度により得られた水分特性曲線を重ねて示した。3種類の速度による水分特性曲線は、封入不飽和領域から過渡的不飽和領域においても良く一致していることが確認できる。3 kPa/minの試験結果については、圧力保持過程で水分平衡状態が確認されていない状況においても、供試体内の間隙水圧 u_w が正確に測定されていれば、目的とする水分特性曲線が精度良く求められることが明らかとなった。

8. まとめ

保水性試験の効率化と試験時間の短縮を目的として新しい保水性試験装置を開発し、その妥当性を実証するための各種試験を行った。

実験には粒度構成が異なる豊浦砂と広島まさ土、DLクレアを用い、従来法の「段階加圧法（加圧板法）」と、新しく開発した「連続加圧法」によって、排水過程から吸水過程の水分特性曲線を求めた。

また、連続加圧法における加圧速度と加圧パターンの影響についても検証を行った。それらの結果をまとめると、以下ようになる。

(1) 連続加圧法による保水性試験の妥当性

段階加圧法と連続加圧法の水分特性曲線には、良好な相関性があることを確認した。

段階加圧法の試験では豊浦砂で31日、広島まさ土で69日、DLクレアで24日を要した。一方、連続加圧法では、3試料ともに2日程度で試験を終了することができ、当初の目的とした大幅な試験時間の短縮が図れた。

段階加圧法の試験時間が長くかかる要因としては、加圧過程よりも減圧過程の吸水に長時間を要することがわかった。また、吸水過程では水分平衡状態の確認が難しいことが、試験時間の長期化の要因でもある。連続加圧法においても、豊浦砂のようにサクシヨンの小さい試料に高い空気圧を加え続けると、吸水過程の試験に長時間かかる場合がある。加圧過程で排水挙動を確認し、排水量が限界（残留含水比）に達した場合には、早い段階で減圧過程に移ることが、精度の高い試験結果を得る条件でもある。

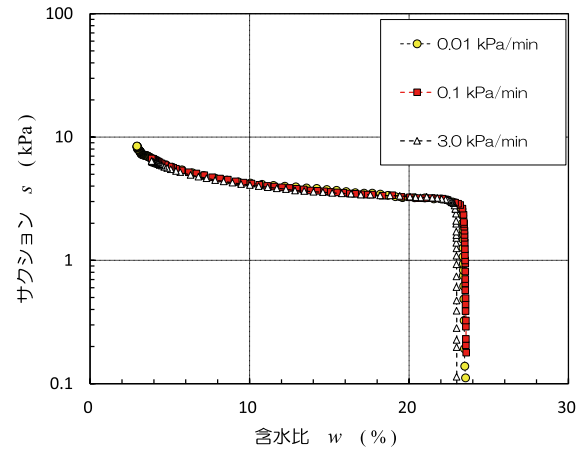
豊浦砂のような単一粒径の砂および礫質土等は、保水力が小さいため間隙内で保持されている水分のほとんどが過渡的不飽和領域で排水される。そのため、高いサクシヨンを負荷しても微量な排水量から懸垂水不飽和領域を含む水分特性曲線を求めることが難しいことがわかった。過渡的不飽和領域と懸垂水不飽和領域の変化点は、段階加圧法では精度良く求められないが、連続加圧法では求められることを確認した。

(2) 連続加圧法における加圧速度と加圧パターンの影響

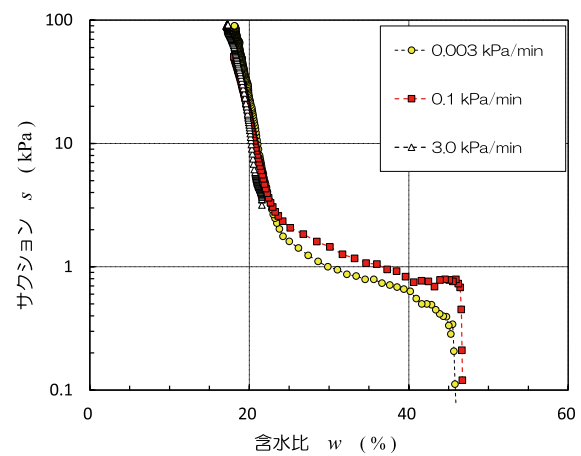
加圧速度については、0.1 kPa/min を基本とすれば問題はないと考えられる。加圧速度を必要以上に遅くするよりも、間隙水圧 u_w や排水量の挙動から加圧パターンを選択する方法が有効である。

一方、加圧速度の違いが間隙水圧 u_w や排水量に影響を与えていることも明らかとなったことから、さらに多くの種類の試料について試験を実施し、適切な加圧速度を決定するための指標を得る必要がある。

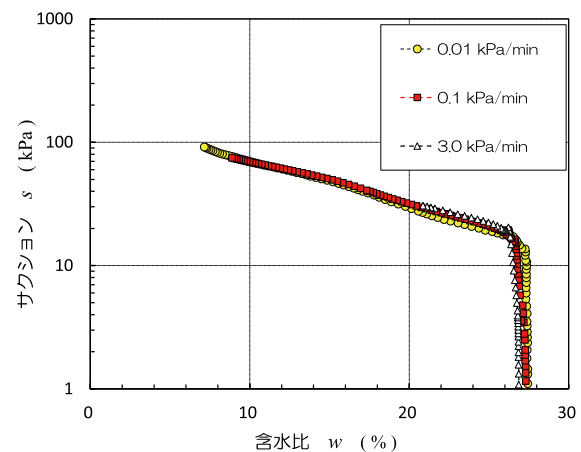
空気圧の加圧パターンについては三角形載荷で加圧・減圧を行った後、空気圧を0 kPaに戻した状態で吸水の収束を確認する方法が理想的である。細粒分の多い試料で加圧中の排水遅れや間隙水圧 u_w の消散が明瞭でない場合には、三角形載荷で所定の空気圧に達した後、その圧力をしばらく保持（台形載荷）してサクシヨン s ($s = u_a - u_w$) の変化を観察した後、吸水過



(a) 豊浦砂



(b) 広島まさ土



(c) DLクレア

図-48 加圧速度の異なる水分特性曲線の重ね合せ

Fig. 48 Water retention curves at different pressurization rates

程に移る方法が理想的である。

(3) 水分特性曲線の形状

水分特性曲線の形状は土の種類によって、その形状が異なり、式(4)に示したように、 D_{10} (有効径)が空気侵入値や試料のサクシヨンに影響を与えていることが推察される。しかし、広島まさ土のような風化の程

度によって粒度構成や粒子の性状が異なる試料は、水分特性曲線も変化することに留意しなければならない。

水分特性曲線には排水過程と吸水過程の間にヒステリシスが生じ、ヒステリシスは豊浦砂のような均一粒径の試料では小さく、細粒な試料や粒径幅の広い材料で大きいと考えられる。

細粒な試料や粒径幅の広い材料では、排水過程よりも吸水過程（不飽和状態から飽和状態に移行する過程）のほうが水分保持力が低下する傾向にある。このような現象は、広島まさ土で顕著に表れており、降雨の浸透によるサクシジョンの低下が著しい材料であると考えられる。

9. おわりに

加圧板法を含む土の保水性試験の多くは定常法であって、試料に任意の圧力（サクシジョン）を与えて、試料内の水分状態が平衡状態になるのを確認する方法が採られている。加圧板法ではこのような操作を繰り返して水分特性曲線を得ているため試験に長時間要していた。

加圧板法の測定上の課題としては、異なるサクシジョンで排水される水分量には大きな差があり、高サクシジョン領域では微量な排水量から水分平衡状態を判断し、水分特性曲線を作成していた。また、保水性試験では試料の物性に依りて広い範囲の空気圧を与えること、試験に長時間を要することなどから排水量の蒸発にも注意しなければならず、温度や湿度がコントロールされた試験環境が要求される。

このようなことから、保水性試験は操作等は単純でも信頼性の高い結果を得るのが難しい試験であり、また、試験に数ヶ月もかかるような試験であることから、実務で実施されることは稀であった。

これに対して、連続加圧法による保水性試験では短時間で水分特性曲線が求められ、加圧パターンの選択によって精度の高い試験結果を得られることが確認できた。

今後は、連続加圧法によって水分特性曲線と併せて不飽和透水係数を求める方法を検討し、不飽和浸透特性を求めるための室内試験の普及を図りたいと考えている。

謝辞

本装置の開発にあたっては、元長野工業高等専門学校 阿部廣史教授から貴重なマイクロテンシオメータを提供していただいた。そこから装置の開発に至ったものである。阿部教授には、装置の開発や試験方法全般に渡り多大なご指導をいただいた。深く感謝申し上げます。

高知大学 笹原克夫教授からは広島まさ土を対象と

した試験方法ならびに試験結果に対するご指導、ご助言をいただき、この試験法の妥当性の検証にたどり着いた。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安原一哉. 地球温暖化と複合地盤災害. 地盤工学会誌. 2009, vol.57, no.4, p.1-5.
- 2) 国土技術研究センター編. 河川堤防の構造検討の手引き. 2002, 151p.
- 3) 竹下祐二, 加藤正司. 不飽和土の室内試験方法の現状. 土と基礎. 2007, vol.55, no.9, p.11-13.
- 4) 川原孝洋, 畠山正則, 京野 修, 阿部廣史. 連続加圧方式による新しい保水性試験方法について(その1). 第47回地盤工学研究発表会講演集. 2012, p.691-692.
- 5) 畠山正則, 川原孝洋, 京野 修, 阿部廣史. 連続加圧方式による新しい保水性試験方法について(その2). 第47回地盤工学研究発表会講演集. 2012, p.693-694.
- 6) 畠山正則, 川原孝洋, 京野 修. 連続加圧方式による新しい保水性試験方法について—連続加圧法と段階加圧法による試験結果の比較—. 第1回 地盤工学から見た堤防技術シンポジウム委員会報告・講演概要集. 2013, p.60-63.
- 7) 京野 修, 畠山正則, 川原孝洋, 陣内龍太郎, 関英理香, 笹原克夫. 連続加圧方式による広島まさ土の保水性試験結果(その2). 平成26年度砂防学会研究発表会概要集. 2014, p.A-44-A-45.
- 8) 畠山正則, 京野 修, 笹原克夫, 阿部廣史. 連続加圧方式による新しい保水性試験方法. 第59回地盤工学シンポジウム 平成26年度論文集. 2014, p.103-110.
- 9) 地盤工学会編. 不飽和地盤の挙動と評価. 丸善, 2004, p.11-76.
- 10) 土壌物理研究会編. 土の物理学—土質工学の基礎—. 森北出版, 1979, p.211-232.
- 11) 山口柏樹. 土質力学. 技報堂, 1969, p.50-53.
- 12) 箭内寛治, 飯竹重夫. pFの工学的応用(その1). 土と基礎. 1987, vol.35, no.2, p.99-105.
- 13) 向後雄二. 不飽和土の土質力学的特性と土質構造物の安定性に関する研究. 学位論文, 東京大学, 1994, p.78.
- 14) Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons, 1993, p.112.
- 15) 東山 勇, 石田朋靖. pFの基本的意味(その2). 土と基礎. 1986, vol.34, no.12, p.71-76.
- 16) 地盤工学会編. 地盤材料試験の方法と解説, 第3編7章 土の保水性試験, 2009, p.162-173.
- 17) 阿部廣史, 畠山正則. 不飽和土の一斉一軸・三

- 軸圧縮試験の結果について[中間報告]. 不飽和地盤の調査・設計・施工に関するシンポジウム発表論文集. 地盤工学会, 1993, p.23-58.
- 18) 森也寸志, 木原康孝, 井上光弘, 福島 晟. マルチステップ流出法による不攪乱土壌の不飽和透水係数の推定. 農業土木学会論文集. 2001, vol.69, no.3, p.309-316.
 - 19) 阿部廣史. 不飽和土の保水性・透水性の新試験法に関する研究. 平成16年～17年度科学研究費補助金研究成果報告書. 2006, 112p.
 - 20) 阿部廣史, 豊田富晴, 小西純一, 松下英次, 芝 博史. 連続負荷による土の保水特性試験について. 土木学会中部支部, 平成16年度研究発表会講演概要集. 2005, p. 291-292.
 - 21) 森本紘文, 豊田富晴, 阿部廣史, 小西純一. 土の保水特性に関する新しい試験法について. 土木学会中部支部, 平成16年度研究発表会講演概要集. 2005, p.241-242.
 - 22) 森本紘文, 豊田富晴, 阿部廣史, 小西純一. サクシオンを連続的に負荷する新しい保水性試験法について. 土木学会中部支部, 平成17年度研究発表会講演概要集. 2006, p. 267-268.
 - 23) 森本紘文, 阿部廣史, 豊田富晴, 小西純一. 新しい保水試験法による乾湿繰返しについて. 第41回地盤工学研究発表会. 2006, p.865-866.
 - 24) Brooks, R.H. and Corey,A.T.. Properties of porous media affecting fluid flow. ASCE . IR 2, 1966, p.61-88.