

不飽和土の水分保持特性把握のための連続加圧型加圧板法に関する研究

工学部 酒匂 一成

1. はじめに

不飽和土の水分保持特性と強度特性を関連付けることにより、豪雨時の斜面、道路法面、河川堤防等の安定性を定量的に評価することができるため、不飽和土の水分保持特性の把握が重要である。

不飽和土の水分保持特性を得るためには、保水性試験を実施する必要があるが、水頭法、土柱法、加圧板法、遠心法、蒸気圧法など、様々な試験法が提案されてきている¹⁾。その中でも豪雨時の土砂災害に必要な圧力範囲を計測するために、加圧板法が良く用いられる。しかしながら、土の細粒分が増えることにより、保水性が高く、透水性が低くなるため、試験時間が非常にかかる課題がある。そこで、近年、計測時間を短縮できると考えられる連続加圧型加圧板法の開発が進められている^{2) 3)}。申請者らもこれまで、その開発を進めてきたが、セラミックディスクの排水性など、試験結果への影響を与える課題が明らかになってきている⁴⁾。

本研究では、それらの課題の改善のため、試験装置の改良に取り組み、改良後の装置を用いた保水性試験から改良効果について考察する。

2. 改良前の保水性試験装置の概要と課題

(1) 改良前の保水線試験装置の概要

図-1 に改良前の試験装置の概要図を示す。この装置は、地盤工学会に基準化されている加圧板方式¹⁾に基づいた試験装置であり、供試体（直径 6cm、高さ 2cm）が入った圧力セル内に間隙空気圧（セル圧、CP） $u_{a,CP}$ を負荷させ、排水容器と電子天秤が入った圧力チャンバー内に間隙空気圧（背圧、BP） $u_{w,BP}$ を負荷することで、サクション制御を行なうことができる（軸移動法）。また、供試体底部のセラミックディスク付きペDESTAL（写真-1）には、間隙水圧測定用と排水用の経路があり、排水用経路は、排水容器と電子天秤が入った容器に接続されている。ペDESTALに付けられたセラミックディスクは、厚さが 5mm、空気侵入値が約 106kPa、透水係数が約 5.78×10^{-9} m/sec のものを使用した。

これらにより、間隙水圧 $u_{w,bottom}$ と排水量がそれぞれ 1 分間隔で計測されている。サク

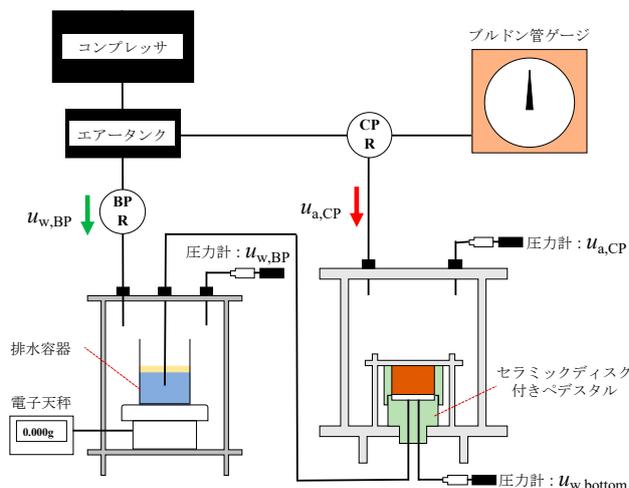


図-1 改良前の試験装置の概要図³⁾

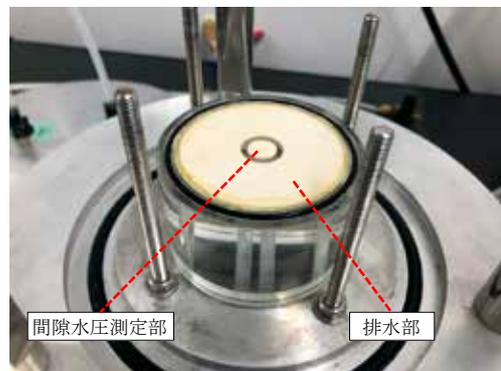


写真-1 ペDESTAL

シヨン $s_{u,bottom}$ は、セル圧 $u_{a,CP}$ と間隙水圧 $u_{w,bottom}$ の差から算定される。図-2 に本試験装置におけるサクシオン測定の概要を示す。図-2 は、一例としてセル圧 $u_{a,CP}=100\text{kPa}$ 、背圧 $u_{w,BP}=50\text{kPa}$ に制御した場合における供試体下部での間隙水圧の計測値 $u_{w,bottom}$ の経時変化の模式図を示している。通常、サクシオン制御後の供試体の間隙水圧は、時間とともに背圧に近づいていく。

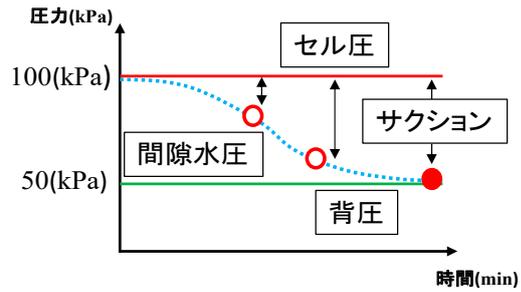


図-2 セル圧、背圧、間隙水圧の経時変化

長期間経過後、供試体からの水の出入りが無くなった時（排水容器の重量変化がほとんどなくなる時）が平衡状態であり、供試体内の間隙水圧は、背圧とほぼ等しくなる。従来の保水性試験では、この平衡時の吸排水量とセル圧と背圧で制御されたサクシオンのプロットを結んで水分特性曲線を描いていた。一方、森本らの試験法²⁾では、平衡に至る過程での間隙水圧値と吸排水量から水分特性曲線を得ており、平衡状態になるのを待たずに次の段階のサクシオン測定過程に移ることで、時間短縮を図っている。

(2) 改良前の保水線試験装置の課題

ここでは、改良前の保水性試験装置の課題⁴⁾について、試験結果に基づいてまとめる。試験試料として豊浦砂を用い、供試体は直径 60mm、高さ 20mm のモールドに含水比 $w=25.0\%$ 、間隙比 $e=0.78$ で、締固めたものを用いた。試験は、背圧を 50kPa で一定としセル圧を 50kPa、60kPa、65kPa、70kPa と段階的に増加（排水過程）させ、70kPa に達した後、60kPa、55kPa、50kPa と段階的に減少（吸水過程）させて、サクシオン制御を行なった。また、セル圧は、平衡状態に達した（電子天秤で計測される給排水量が 0.01g/hour 以下）後に、次の段階へ手動で変化させた。

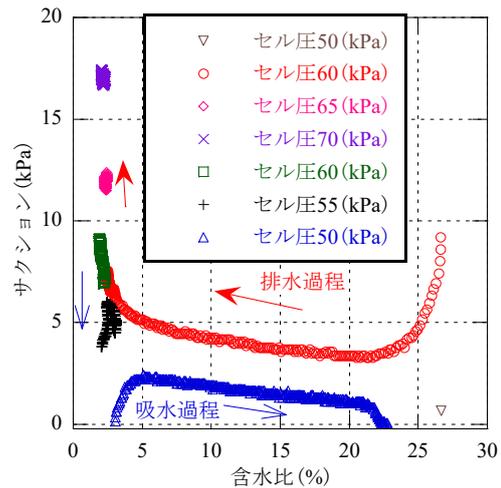


図-3 水分特性曲線

図-3 は、1 分間隔で計測されたサクシオンと含水比の関係である。含水比は、試験後に供試体の含水比を計測し、電子天秤で計測された吸排水量から計算されたものである。図-3 より、セル圧を 60kPa に増加させた排水過程とセル圧を 50kPa に減少させた吸水過程において、水分特性曲線が乱れている様子が見られる。この原因は、セラミックディスクの透水係数が低く、間隙水圧測定にタイムラグが生じている可能性があるためと考えられる。そのため、供試体がない状態での間隙水圧変動を観測したところ、約 30 分のタイムラグがあることが分かった。

図-4 は、排水過程のセル圧 60kPa、背圧 50kPa に設定した時のセル圧、背圧、間隙水圧の時系列変化を示す。セル圧と背圧を制御後、約 45 分間、間隙水圧はセル圧に近づいていき、その後 200 分近くまで急激に背圧に近づいていく挙動が見られる。図-3 のセル圧 60kPa の際の含水比が約 22%~27% の範囲のサクシオン値が大きくなっているのは、図-4 における間隙水圧がセル圧に向かって上昇しているときの値である。これは、セラミックディスクの透水係数が低いことが原因であると言える。一方、間隙水圧が背圧に向けて減少し始めた以降のサクシオンは水分特性曲線として妥当な値を示しているものと思われる。

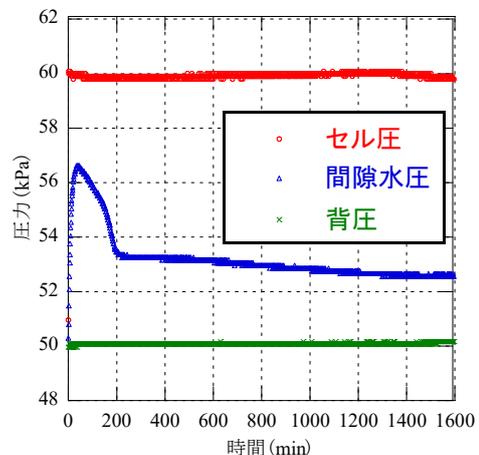


図-4 セル圧、背圧、間隙水圧の時系列変化（セル圧 60kPa、背圧 50kPa）

3. 改良後の保水性試験装置の概要

図-5は、今回改良を行った圧力チャンバー部分のみを示し、それ以外の装置はほぼ同様である。改良前は、土中の間隙水圧を供試体底部のセラミック部分で計測していたが、本来は供試体中央部の間隙水圧を計測する必要があるため、写真-2に示すようなセラミック製ポーラスカップを作製し、供試体中央部に設置可能な試験装置を作製した。

セラミック製ポーラスカップ（大起理化学工業，DIK-8391-51）には、外径8mm，厚さ1.75mm，空気侵入値380kPaのものを使用した。これを接着部分5mm，間隙水圧測定部分10mmとして、長さ15mmのサイズで切り出し、ナイロンチューブに接着した。セラミック製ポーラスカップは、脱気し、管路内に脱気水を充填して、圧力計（共和電業，PGMC-A-500KP）に接続し、土中の間隙水圧を計測できるようにした。

この装置で計測される間隙水圧 $u_{w,center}$ は1分間隔で計測されており、サクシオン $s_{u,center}$ は、図-2に示す方法と同様に $u_{a,CP}$ と $u_{w,center}$ の差から算定される。

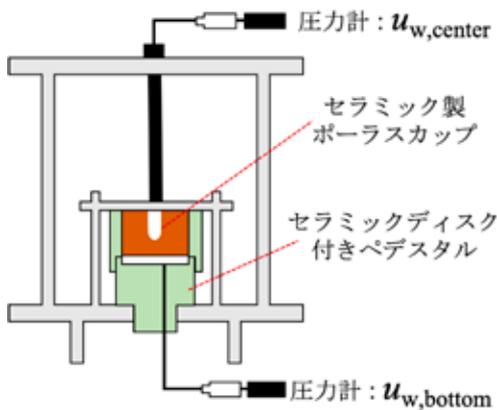


図-5 改良後の試験装置の概要図

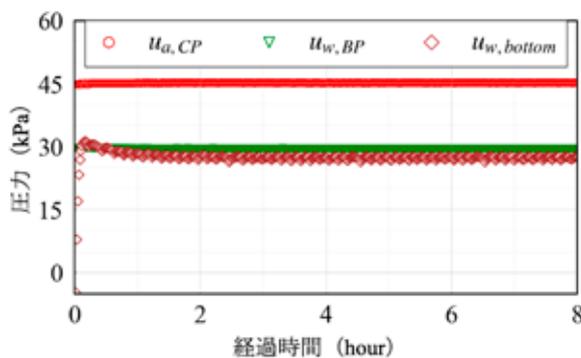


写真-2 セラミック製ポーラスカップ

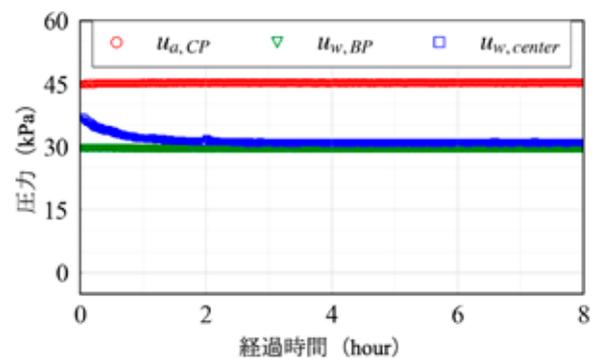
4. 試験装置改良効果および連続加圧型加圧版法の妥当性に関する検討

試験装置の改良前後における土中の間隙水圧や水分特性曲線について確認するために、鹿児島市東俣町の表層から深度50cmで採取した土試料を初期含水比 $w=37.7\%$ ，間隙比 $e=1.06$ に設定した上で締め固め、室内試験を実施した。今回の試験のサクシオン制御は、排水過程のみとし、背圧 $u_{w,BP}$ を30kPaで一定に負荷し、セル圧 $u_{a,CP}$ を45kPa→60kPa→75kPa→90kPaと段階的に増加させた。また、今回の試験では従来の加圧板法と同様に各サクシオン制御段階において、供試体内のサクシオンが平衡状態に達するまで実施することとした。電子天秤で計測される排水量が0.01g/hour以下になったときを平衡状態とした。

図-6にセル圧45kPa時のセル圧，背圧，間隙水圧の時間変化を示す。図-6(a)は改良前の装置



(a) 改良前の装置による試験結果



(b) 改良後の装置による試験結果

図-6 セル圧45kPa時の計測結果

による試験結果を示しており、セル圧 $u_{a,CP}$ 変動直後は、2(2)節で述べた結果と同様に間隙水圧 $u_{w,bottom}$ が、約 10 分遅れて増加した。なお、 $u_{w,bottom}$ の計測結果の微小変動や背圧よりも約 2kPa 低い値を示すことが確認されており、今後、その原因について調査する必要がある。一方、図-6(b)に改良後の装置による試験結果を示しており、セル圧制御後に間隙水圧の時間遅れが生じることなく圧力増加したため、装置の改良効果がみられた。

図-7 に改良前後における水分特性曲線の比較を示す。改良前の曲線は、間隙水圧の応答に時間遅れの影響を受け、2(2)節における図-3 と同様な、一般的な水分特性曲線で観測されない値が示されることが確認された。一方、改良後の曲線は、改良前に比べて、より現実的な曲線が得られていることが確認された。しかし、改良後の水分特性曲線において 1 つ他の点からずれた値 ($w=30.5\%$, $u_{w,center}=39.7\text{kPa}$) が得られたが、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ることから、セル圧変動時の計測結果の取り扱いに気を付ける必要があるといえる。よって、間隙水圧計測部をセラミック製ポーラスカップに変更することで、間隙水圧計測のタイムラグを改善でき、さらに、供試体中央部での計測が可能となり、より精度の良い水分特性曲線が得られるようになったものと思われる。

図-8 に改良後の装置を用いて、従来法と連続加圧型加圧板法から得られた水分特性曲線の比較を示す。従来法とは、平衡状態のサクシジョンのみをプロットする方法であり、一方、連続加圧型加圧板法は平衡状態に至る前でのサクシジョン(セル圧と間隙水圧の差)をプロットする方法である。一般に、加圧板法で得られる水分特性曲線は、平衡時のサクシジョンと含水比との関係を示しており、平衡前のサクシジョンと含水比で描く連続加圧型加圧板法による水分特性曲線の妥当性について検証が必要であることから、図-8 に示すような試験結果の比較を実施した。

図-8 より、連続加圧型加圧板法から得られた水分特性曲線は、従来法の水分特性曲線のプロット間を補間するように表現されている。このことから、連続加圧型加圧板法で得られた結果が、従来法で得られた水分特性曲線と同等に扱える可能性があると思われる。ただし、セラミックの目詰まり等で、間隙水圧の応答に時間遅れが生じるような場合は、その影響が水分特性曲線に含まれるため、間隙水圧計測部におけるセラミックの排水性に関するメンテナンスが重要である。

5. 試験装置改善のための装置開発

本研究では、上述のように、連続加圧型加圧板法の課題解決のため間隙水圧測定部におけるセラミック製ポーラスカップの改良を実施し、十分な改良効果が得られた。一方で、さらに試験装置の改良を行うための装置開発を行っており、その概要をまとめる。

(1) ペDESTALの改良

図-5 に示す改良後の試験装置では、基本的に供試体は締固めにより作製する不攪乱状態の供試体に対応した装置であった。しかし、実務的には、原位置の供試体を不攪乱で採取し、その供試

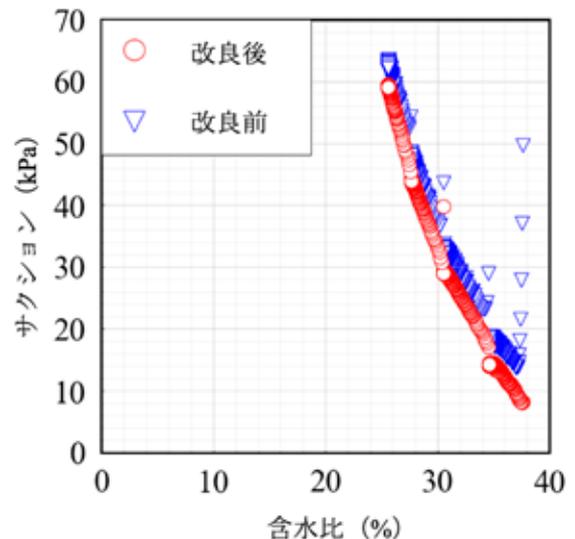


図-7 改良前後における水分特性曲線の比較

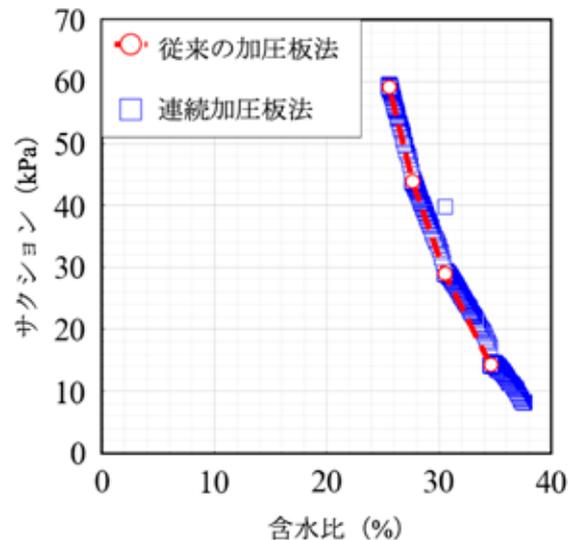


図-8 従来法と連続加圧型加圧板法から得られた水分特性曲線の比較

体の水分特性曲線を得ることが重要であることから、攪乱・不攪乱のいずれの供試体で試験可能なペDESTALを作製した（写真-3）。不攪乱試料を採取するための市販されているステンレス円筒（直径 50mm、高さ 51mm）をペDESTAL上部に設置できる構造とした。また、ペDESTAL底面には間隙水圧測定部が不要になったことから、排水部分をより簡易な構造とし、ペDESTALの耐久性を増すこととセラミックディスクとの接着を容易にするためステンレスで作製した。排水用のセラミックディスク（外形 46mm、厚さ 3mm）は空気侵入値が 70kPa と 300kPa 以上のものを用意し、供試体に応じて使い分けられるようにした。

(2) セラミック製ポーラスカップ部の改善

写真-2 に示したセラミック製ポーラスカップ部に関して、作製自体は容易であるが、ポーラスカップとチューブが接着されており、圧力セルの天板ごと脱気容器に入れる必要があったため、試験準備段階での作業が大変であった。この課題を改善するため、セラミック製ポーラスカップを独立させて、セラミック製ポーラスカップ周辺のみを脱気可能にするための改善を行った。写真-4 に示すように、セラミック製ポーラスカップをステンレス円筒にエポキシ樹脂で接着し、チューブとステンレス円筒部分に継手を入れることで、脱気部分を小型化した。

(3) 圧縮空気加湿容器

セル室に送られる圧縮空気が乾燥していることから、供試体表面部より水分が蒸発していると考えられる。加圧板法では、供試体から排出される水分を計測することで試験値を求めており、排水量の微小変化は得られる結果に影響を与えている。このような課題の改善に向けて、圧縮空気を水中に通すことで加湿し、その空気をセル室へ供給可能な装置を作製した（写真-5）。しかし、加圧段階では問題なく作動していたが、減圧段階では負圧が発生していることで経路内に水分が侵入する課題が確認された。現在、導入には至っていないが、逆止弁を加えることや、別の機構にすることを検討している。



写真-3 改良ペDESTAL



写真-4 改良したセラミック製ポーラスカップ部



写真-5 圧縮空気加湿容器

6. おわりに

本研究では、既往の研究で指摘されたセル圧制御後の間隙水圧の反応の遅れを解決するため、試験装置の改良を行った。改良後の試験装置で得られた結果を考察し、まだ解決すべき点はあるが、概ね課題を改善できたことがわかった。また、従来の加圧板法と連続加圧型加圧板法との試験結果を比較し、連続加圧型加圧板法の結果も従来の加圧板法と同等に扱える可能性を示すことができた。今後は、さらに計測精度や作業性の向上や時間短縮を可能にするための試験装置改良を継続的に実施していきたい。

謝辞

試験装置作製にあたり、理工学研究科技術部の城本一義氏の協力を得た。また、試験を実施に当たり、理工学研究科博士後期課程1年の中島亮輔氏、博士前期課程1年の石大地氏、高田雄大氏の協力を得た。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 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, p.162-173, 2009.
- 2) 森本紘文, 阿部廣史, 豊田富晴, 小西純一: 新しい保水性試験による乾湿繰り返しについて,

- 第 41 回地盤工学会研究発表会講演概要集, pp.865-866, 2006。
- 3) 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, pp.691-692, 2012。
 - 4) 山本孝憲, 酒匂一成: 保水性試験におけるサクシヨ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。