

土中の間隙水に封入された間隙空気量計測のための不飽和三軸試験

不飽和土 水分特性曲線 封入不飽和

名古屋大学 学生会員 ○中澤 一眞

国際会員 吉川 高広 野田 利弘 中井 健太郎

学生会員 西垣 隆士 岡田 知也

1.はじめに

不飽和土は間隙に空気も存在するため、表面張力に起因するサクシオンにより不飽和土の水分量が増減する（水分特性）。また、不飽和土は吸排水量と体積変化量が一致せず、空気の高い圧縮性や排気条件を考慮する必要がある。このように、不飽和土は飽和土よりも複雑な力学挙動を示すため、より精緻に力学挙動を把握する必要がある。

水分特性曲線はサクシオンと水分量の関係を表し、水分量として含水比や体積含水率、飽和度などを用いて記述される。間隙空気には、間隙水に封入されているためサクシオンに関係せず、圧縮性を有する「封入空気」と、連続的に存在するためサクシオンに関係し、圧縮性も有する「連続空気」が存在するが、既往の水分特性曲線においてはこれらの存在量を明確に区別して扱われることは無かった。そこで本研究では、封入空気と連続空気の存在量を把握することを目的として、間隙空気を CO₂ に置き換えた実験を行う。すなわち、封入された間隙 CO₂ が間隙水に完全溶解することを仮定し、通常の空気の場合と比較することで、封入空気量の把握を試みた。

2.実験条件

不飽和三軸試験機に関して、供試体下端に微細多孔質膜¹⁾を、上側に撥水性のポリフロンフィルタをそれぞれ用いてサクシオンを制御した。ここで、本実験で制御するサクシオンが常に 20kPa 以下であり、微細多孔質膜の空気侵入値を超えないことから、微細多孔質膜が機能すると判断した。また、供試体の体積変化量は、内セルの水位変化量から算出し、実験に用いるゴムスリーブは、通常用いる天然ゴム製ではなく、より CO₂ を透過しにくいクロロプレン製のものとした。

実験に用いた土試料は非塑性シルト（DL クレイ）であり、その土粒子密度は 2.70g/cm³ である。

実験方法は、小高ら²⁾に準拠した。本研究で CO₂ を用いた場合の実験概要は次の通りである。(i)含水比 20%になるように調整した試料を用いて、間隙比 1.19、飽和度 46%の不飽和供試体を作製した（初期サクシオンは約 20kPa）。(ii)供試体を三軸試験機に設置し、排気非排水条件下で供試体上端の経路から CO₂ をゆっくり透過させた。その際、供試体下端のメンブレンを数 mm 折り返して、供試体内にもとから存在していた空気を追い出した。(iii)セル圧を 20kPa まで上昇させた後、セル圧と CO₂ 圧を同時に 50kPa 上昇させた。その後 10 分間放置したうえで、セル圧を 150kPa まで上昇させ、基底応力を 100kPa とした。(iv)所定のサクシオン（本稿では 0、7kPa の 2 ケース）となるように水圧のみを変化させ、吸排水量や供試体の体積変化量が収束するまで待った。ここで、排気条件のままサクシオンを作用させると、常に新しい CO₂ が供給され、CO₂ が溶けても水に置き換わらないため、非排気条件にてサクシオンを作用させた。なお、CO₂ の溶解速度の遅さに起因して、サクシオン変化後に CO₂ 圧が一時的に上昇した。その後、CO₂ 圧が当初の 50kPa に戻ったところで排気条件に変更した。

なお、空気を用いた場合の実験概要は、上記の(i)を行わないものの、その他の過程は基本的には同じである。

3.実験結果

サクシオン 0kPa および 7kPa を作用させる場合について、各段階での間隙比・飽和度を表-1 に示す。ここから、サクシオン作用前までの過程で、CO₂ を用いた場合と空気を用いた場合で、供試体の間隙比や飽和度はほぼ変わらないことがわかる。これは、サクシオン作用後の供試体の変化に占める、作用前の状態による差は小さいことを意味する。

表-1 各段階での間隙比・飽和度（サクシオン 0kPa・7kPa）

	サクシオン 0kPa				サクシオン 7kPa			
	飽和度(%)		間隙比		飽和度(%)		間隙比	
	CO ₂	空気	CO ₂	空気	CO ₂	空気	CO ₂	空気
初期状態	44.7	47.2	1.19	1.19	46.6	46.6	1.19	1.19
基底応力 100kPa 載荷後	47.3	49.8	1.12	1.12	49.6	49.1	1.11	1.13
サクシオン作用放置後	90.1	81.9	1.02	1.05	70.0	60.1	1.09	1.11

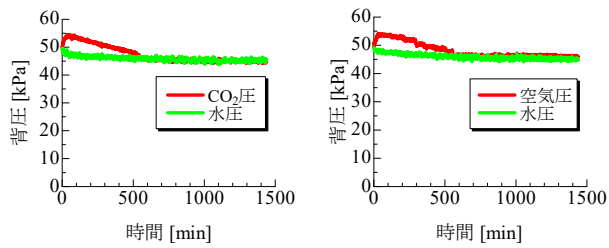


図-1 背圧挙動 (サクシオン 0kPa)

3.1 サクシオン 0kPa を作用させる場合

サクシオン 0kPa を作用させる場合の背圧変化を図-1 に示す。なお、空気を用いた場合は、CO₂ を用いた場合と同じような背圧挙動となるよう、手動で操作した。また、この時の吸水量、体積ひずみ（圧縮を正）の経時変化をそれぞれ図-2(a)に示す。

図-2(a)より、CO₂ を用いた場合の方が、空気を用いた場合よりも吸水量が多くなっていることがわかる。これは、実験前の予想通り、吸水した水に間隙に存在する CO₂ が溶けて、水に置き換わったためであると考えられる。また、CO₂ を用いた場合、体積ひずみも大きくなっていることがわかる。これは吸水量が多いことにより、吸水コラプスによる圧縮量が大きくなったためであると考えられる。さらに、空気を用いた場合には、サクシオン変化後 1440min 経過した段階で、吸水量および体積圧縮量が概ね収束しているのに対し、CO₂ を用いた場合では収束していない。これは、CO₂ の水に溶ける速度の遅さに起因しているものと考察される。これに対し、理論上はサクシオン 0kPa で CO₂ を用いた場合、サクシオン変化後に十分な時間が経てば飽和度は 100%に達し、吸水量および体積圧縮量は収束すると考えられる。しかし、前述のように CO₂ の溶解速度はかなり遅く、また、長時間の試験になると、CO₂ がゴムスリーブを透過する可能性が上がってしまうため、今後、試験時間に関するより詳細な検討が必要である。

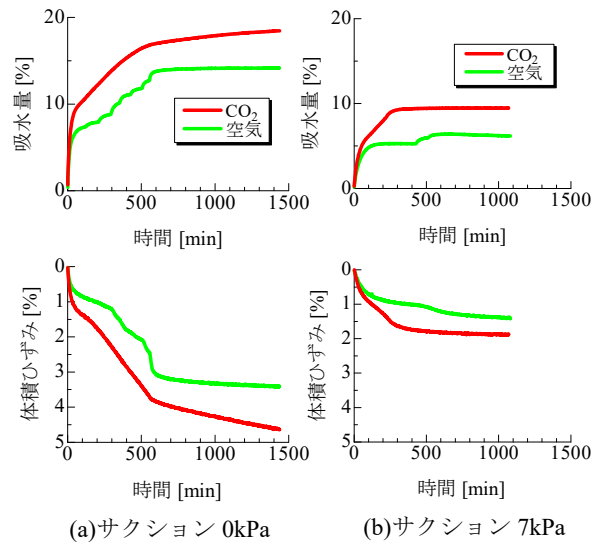


図-2 実験結果

3.2 サクシオン 7kPa を作用させる場合

サクシオン 7kPa を作用させる場合の吸水量、体積ひずみの経時変化を図-2(b)に示す。

図-2(b)より、本実験では、サクシオン 0kPa を作用させる場合と同様の傾向の結果を得ることができたと考える。サクシオン 0kPa の場合と比べて、CO₂ を用いた場合と空気を用いた場合の両方で吸水量が減ったことは、不飽和土の水分特性によるものだと考えられる。また、それに伴ってコラプス現象による体積圧縮量も小さくなっている。また、本実験では、CO₂ を用いた場合と空気を用いた場合の両方でおよそ 1000min 経過時に吸水量および体積圧縮量が収束していることがわかる。

4. おわりに

本研究では、間隙空気を CO₂ に置き換えた実験を行った。その結果、まずサクシオン付与以前の過程で、CO₂ は供試体の間隙比や飽和度に影響を与えないことを示した。従って本研究で用いた方法は、サクシオン作用後の空気と二酸化炭素による実験結果の違いを正確に把握できる方法であると言える。

また、間隙空気が CO₂ の場合、空気の場合の各供試体にサクシオン 0kPa、7kPa をそれぞれ作用させた。その結果、いずれのサクシオンによる試験でも、CO₂ を用いた場合は、間隙水に封入された CO₂ が間隙水に溶解することで、より飽和度が上がることを示した。特に、サクシオン 0kPa を作用させるの場合には、より長時間かけて実験を行うことで、CO₂ を用いた場合と空気を用いた場合の試験結果の差が大きく見られると予想される。

以上より、本研究で行った間隙空気を CO₂ に置き換える試験により、不飽和土供試体の封入空気量を把握することができると考える。しかし、最終段階で間隙比が等しくならず、単純な吸水量差のみで封入空気量を判断できないこと、また、CO₂ の溶解速度の遅さやゴムスリーブ透過の可能性なども考慮して、より詳細に試験時間を決める必要があることなど、課題も残った。

今後は、上記の課題について検討を行った後、間隙比やサクシオンを変えながら引き続き試験を行っていく予定である。最終的には、封入空気と連続空気の遷移を把握し、より精緻な水分特性の理解に繋げていきたい。