

二酸化炭素を用いた三軸試験による不飽和土中の封入空気量の把握 (Measurement of volume of trapped pore-air in unsaturated soil by triaxial test using carbon dioxide)

中澤一眞¹, 吉川高広¹, 野田利弘², 中井健太郎¹, 西垣隆士³, 岡田知也⁴

1 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 nakazawa.kazumasa@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学減災連携研究センター

3 東海旅客鉄道株式会社

4 中日本高速道路株式会社

概 要

不飽和土は間隙中に空気も有し、表面張力に起因したサクシオンにより水分量が変化する(水分特性)。この水分特性を考える際に、間隙空気に着目すると、連続的に存在しサクシオンと関係する「連続空気」と、間隙水中に封入されサクシオンと無関係な「封入空気」が存在しているため、両者を区別して扱うことが望ましい。本研究では、連続空気と封入空気存在量を把握することを目的として、間隙空気を水への高い溶解性を持つ二酸化炭素(CO₂)に置き換えた実験を行った。間隙水に封入された間隙CO₂が完全溶解すると仮定し、空気の場合と比較することで、封入空気量を把握できると考えた。まず、CO₂を扱う場合の実験条件について検討を行った。次に、検討した実験条件に基づいて保水性試験を行った結果、CO₂を用いた場合には、封入空気として存在するはずのCO₂が間隙水に溶解し、供試体はより高い飽和度となることを示した。

キーワード：不飽和土、水分特性曲線、封入不飽和、三軸試験

1. はじめに

不飽和土は間隙中に空気も有し、表面張力に起因したサクシオンにより水分量が変化する(水分特性)。また、サクシオンが高いほど強度が大きくなること、空気が高い圧縮性を有することに代表されるように、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飽和度、体積含水率などを用いて記述される(本論文では飽和度を用いて記述する)。本研究では従来までとは異なり、間隙空気を、間隙水中に封入されサクシオンと無関係な「封入空気」と、連続的に存在しサクシオンと関係する「連続空気」に分けて、水分量(飽和度)を扱うことを考える。そこで、封入空気と連続空気存在量を把握することを目的として、間隙空気を二酸化炭素(以後、CO₂と呼ぶ)に置き換えた実験を行う。すなわち、不飽和土において、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

2.1 土試料

実験に用いた土試料は非塑性シルト(DLクレイ)であり、その粒径加積曲線を図1に示す。また、その土粒子密度は2.70g/cm³であった。

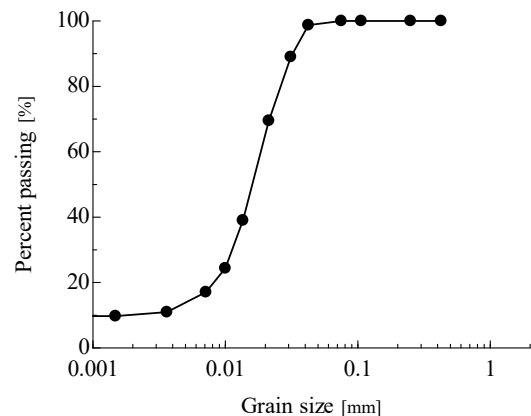


図1 粒径加積曲線

2.2 実験機の概要

不飽和三軸試験機に関して、供試体下端に微細多孔質膜

り、上端に撥水性を持つポリフロンフィルタを用い、間隙水と間隙空気の経路を分離し、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 以下で低サクシオンであることから、微細多孔質膜が正常に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た。さらに、実験に用いるゴムスリーブは、通常用いる天然ゴム製のものではなく、より CO₂ を透過しにくいクロロプレン製のものとした。

2.3 実験手順

小高ら²³⁾の実験手順を参照した。本研究での CO₂ を用いた場合の基本的な実験手順は次の通りである。(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 をゆっくりと通した。ここで、供試体下端のメンブレンを数 mm 程度折り返すことで、供試体にもとから存在していた空気を供試体下部から追い出し、CO₂ に置換した。(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。なお、この過程において CO₂ 圧が高い場合、実験機解体時に圧力の減少に伴い、水に溶解していた CO₂ が析出し、上部の空気側の経路に水が流れ込み、実験終了時の供試体の含水比測定が困難になるため、本研究では CO₂ 圧は比較的低めの 50kPa とした。(iv)所定のサクシオン (0, 7kPa の 2 ケース) となるように水压のみを変化させた。供試体の初期のサクシオンが約 20kPa であるため、供試体は吸水する。

なお、空気を用いた場合の実験概要は、上述の(ii)を行わないものの、その他の過程は同じである。

2.4 サクシオン作用時における排気条件の検討

従来 of 空気を用いた実験では、一定のサクシオンを作用させる場合、空気圧一定の排気 (・排水) 条件で実験を行う。本実験では、予め供試体の間隙空気が CO₂ に置換されており、吸水時に封入される CO₂ は脱気水に溶けることを想定している。これにより、通常の空気の場合よりも吸水量が多くなるという予測の下、まずは排気条件下でサクシオン 0kPa を作用させた。この時の吸水量の経時変化を図 2 に示す。空気の場合と CO₂ の場合で吸水量にほとんど差が見られないことがわかる。これは、排気条件下でサクシオン 0kPa を作用したため、CO₂ が吸水した脱気水に溶けながら、常に新しい CO₂ が供給され続けていたからだと考えられる。

そこで、当初から供試体の間隙内に存在していた CO₂ のみを、吸水した脱気水に溶かすことを念頭に、非排気条件下でサクシオン 0kPa を作用させた実験の結果を図 3 に示す。なお、比較として空気の場合の排水条件下での吸水量も再掲する。これより、非排気条件下であるにもかかわらず、CO₂ を用いた試験では、排気条件下で空気を用いた

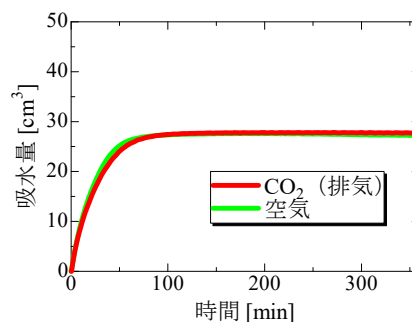


図 2 排気条件下での吸水量の比較

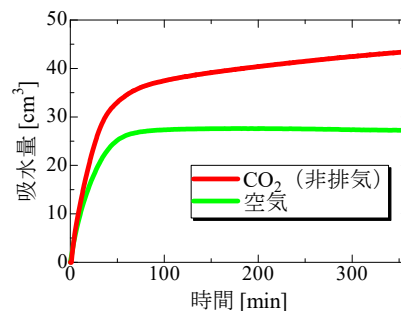


図 3 非排水条件下での吸水量の比較

試験結果と比較して、吸水量が増えたことがわかる。これより、間隙空気を CO₂ に置換した実験から封入空気量を把握するには、当初から供試体の間隙内に存在していた CO₂ のみを対象とする必要があるため、非排気条件下でサクシオンを作用させる必要があることが分かった。従って、これ以降、非排気条件下でサクシオンを作用することとした。

3. CO₂ を用いた不飽和シルトの保水性試験

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 および表 2 にそれぞれ示す。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)

	飽和度(%)		間隙比	
	CO ₂	空気	CO ₂	空気
初期状態	44.7	47.2	1.19	1.19
基底応力 100kPa 載荷後	47.3	49.8	1.12	1.12
サクシオン作用放置後	90.1	81.9	1.02	1.05

表 2 各段階での間隙比・飽和度 (サクシオン 7kPa)

	飽和度(%)		間隙比	
	CO ₂	空気	CO ₂	空気
初期状態	46.6	46.6	1.19	1.19
基底応力 100kPa 載荷後	49.6	49.1	1.11	1.13
サクシオン作用放置後	70.0	60.1	1.09	1.11

3.1 サクシオン0kPa を作用させた場合の実験結果

サクシオン 0kPa を作用させる場合の背圧の経時変化を図 4 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）の経時変化を図 5 に示す。吸水量および体積ひずみは、サクシオン作用直前の供試体体積で除した値を用いている。

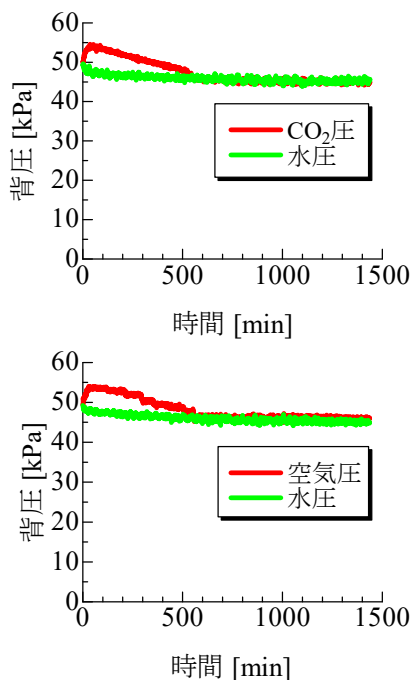


図 4 サクシオン0kPa での背圧の経時変化

図 5 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、吸水した水に封入空気として存在する 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 1 日 (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 CO₂を用いたサクシオン 0kPa の試験では、サクシオン作用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より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。

3.2 サクシオン7kPa を作用させた場合の実験結果

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 6 に示す。

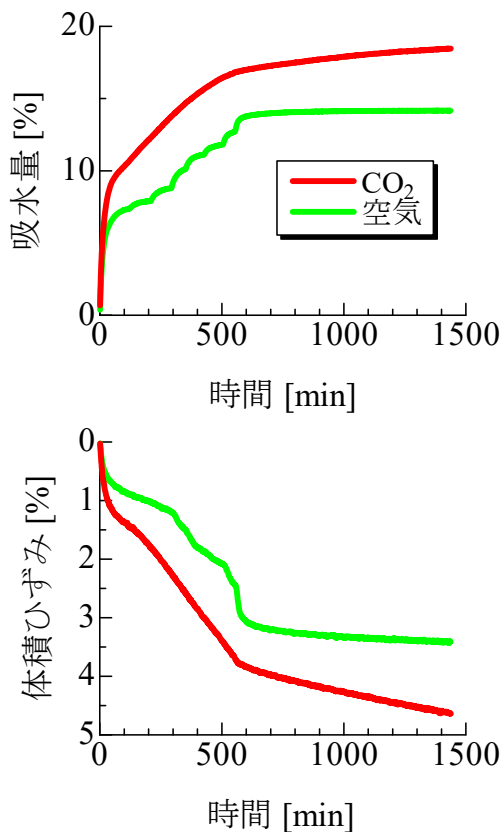


図 5 サクシオン0kPa での実験結果

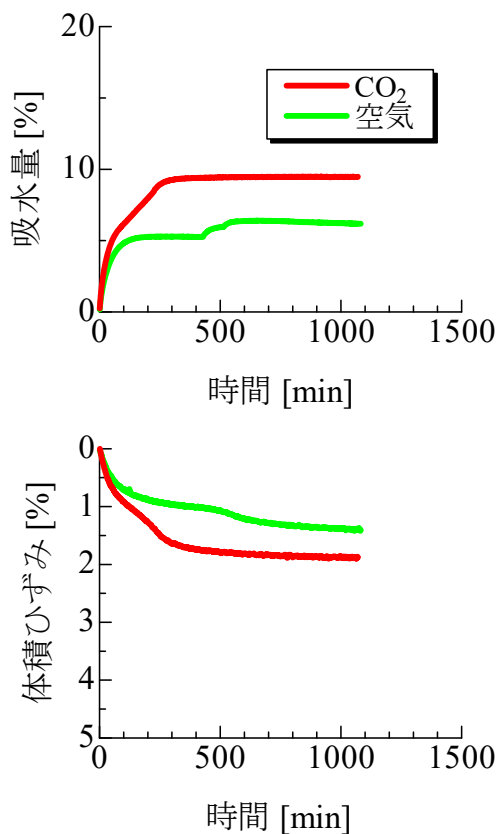


図 6 サクシオン7kPa での実験結果

図 6 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う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ういた場合の両者でおおよそ 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。

また、空気の場合と CO₂ の場合の吸水量の差を考えると、サクシオン 7kPa よりもサクシオン 0kPa の時の方が大きくなっている。ここから、サクシオン 0kPa の不飽和土の方がより多くの封入空気を含んでいることが分かった。

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。まず、CO₂ を用いる場合のサクシオン変化時の排気条件について検討を行った。その結果、非排気条件下でサクシオンを作用させることにより、供試体にもとから存在していた CO₂ のみを吸水した脱気水に溶解させ、飽和度が高くなることを示した。

また、サクシオン付与以前の過程で、空気の場合と CO₂ の場合の比較から、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供試体の変化をより正確に把握できる方法であると言える。

次に、サクシオン 0kPa, 7kPa をそれぞれ作用させた実験を行った。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ういた場合の試験結果の差が大きくなると予想される。

以上から、本研究で行った間隙空気を CO₂ に置き換える方法により、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。そして、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。

謝辞

JSPS 科研費 17H01289 と 17K14720 の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) Nishimura, T., Koseki, J., Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Microporous membrane technology for measurement of soil-water characteristic curve, *Geotechnical Testing Journal*, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208, 2012.
- 2) 小高猛司, 鈴木宏尚, 岡二三生: 排気・排水条件を制御した不飽和シルトの三軸圧縮試験, 第18回中部地盤工学シンポジウム, 地盤工学会中部支部, 6, 2006.
- 3) Oka, F., Kodaka, T., Suzuki, H., Kim, Y.-S., Nishimatsu, N. and Kimoto, S.: Experimental study on the behavior of unsaturated compacted silt under triaxial compression. *Soils and Foundations*, 50(1), 27-44, 2010.