

間隙気体の溶解度が不飽和砂質土のせん断特性に及ぼす影響

東北大学 学 ○勝野 悠作・小澤 加苗 正 風間 基樹・渦岡 良介

1. 研究の背景と目的

不飽和土が温度変化を受けると、間隙気体の体積や圧力が変化する。その変化は、ボイル・シャルルの法則やヘンリーの法則に支配される。また、土がせん断を受ける時は、ダイレイタンスによる土骨格の変化が生じ、結果的に間隙気体の体積や圧力が変化する。しかしこの様な間隙気体の状態変化が、土のせん断特性に及ぼす影響についてはよくわかっていない。本研究は、溶解度の違いに着目し、不飽和砂質土のせん断特性に及ぼす間隙気体の体積や圧力の変化の影響を検討したものである。

2. 間隙内の気体が不飽和土の有効応力状態に及ぼす影響

2.1 有効応力式

不飽和土に作用している有効応力は、一般に以下の Bishop の有効応力式によって表される。

$$\sigma' = (\sigma - u_g) + \chi(u_g - u_w) \quad (1)$$

ここに、 σ' ：有効応力、 σ ：全応力、 u_g ：間隙気体圧（水蒸気圧を含む）、 u_w ：間隙水圧、 χ ：サクシオンパラメータ（本研究では飽和度 S_r を用いた）である。

2.2 気体の状態変化

間隙気体の状態変化は、ボイル・シャルルの法則によって支配されている。非排気非排水条件下では、任意の時間に間隙の気相・液相の気体の状態について以下の式が成り立つ。

$$\frac{(u_g - u_{wv})(V_g + V_{gd})}{T} = \text{一定} \quad (2)$$

ここに、 u_{wv} ：水蒸気圧、 V_g ：間隙気相の体積、 V_{gd} ：気相と見なした時の溶解気体体積、 T ：気相の絶対温度である。状態平衡が成り立っているときの乾燥気体と溶解気体の分圧は等しい。

溶解や状態変化の平衡が瞬時に成り立つと仮定すると、式 (2) より、温度が ΔT 変化した時、または気相体積が ΔV_g 変化した時の間隙気体圧を次のように表せる。

$$u_a = (u_{g0} - u_{wv0}) \frac{\frac{V_{g0} + V_{gd0}}{T_0}}{\frac{(V_{g0} + \Delta V_g) + V_{gd}}{T_0 + \Delta T}} + u_{wv} \quad (3)$$

式中の添え字 0 は間隙気体圧定常時の状態量を表している（以下同じ）。水蒸気圧 u_{wv} は、文献¹⁾から得た飽和水蒸気圧と、サクシオンと相対湿度の関係式から得ることができる。

2.3 気体の液相への溶解量

文献¹⁾から、水に溶解する空気と CO_2 の量と温度の関係を表す溶解度曲線を得た。また、比較的溶解度の低い空気や CO_2 は、試験条件下でヘンリーの法則が

成り立つ。よって、溶解量はその分圧 ($u_g - u_{wv}$) に比例する。すなわち、その時の温度、分圧で平衡に達した空気、または CO_2 の間隙水への溶解体積 V_{gd} が理論的に求められる。

2.4 試験条件下での、溶解度の影響の予測

間隙気体の種類の違いによる、間隙水への溶解度の違いの影響としては、以下の3つがある。

- 1) 温度が一定での影響
 - 2) 非排気非排水条件下で温度変化することでの影響
 - 3) 排気排水条件下での温度変化後の影響
- ここでは、1)、2) について述べる。

3. 本研究で使用する三軸試験機について

本研究で用いた不飽和土用三軸試験機は、岩渕²⁾らが開発した、供試体の温度を制御できる試験機を改良したものである。間隙気体経路に CO_2 ボンベからの経路と真空圧の経路を繋ぎ、コックにより、 CO_2 圧と真空圧を切り替えることができる。

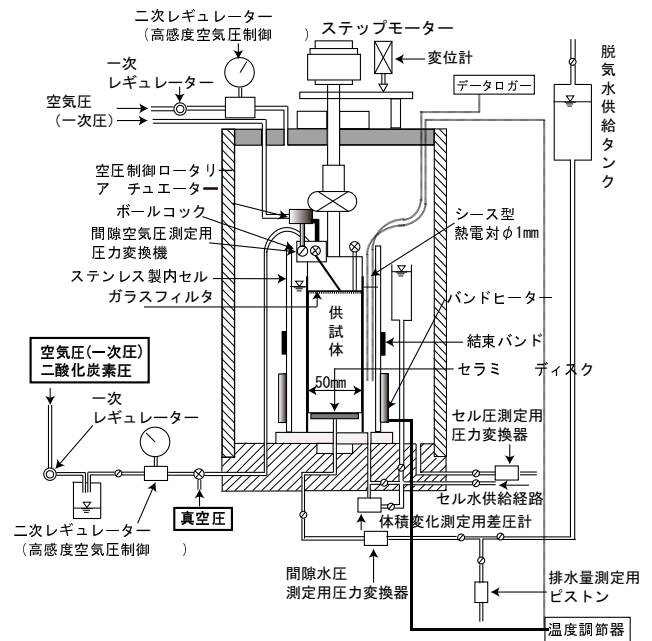


図-1 CO_2 の充填が可能な三軸試験機

4. 試験概要

4.1 使用材料（豊浦砂）について

本研究で用いた豊浦砂は、比較的粒径が揃っており透水性がよいため、サクシオンの値が低い。すなわち、式 (1) に表される、サクシオンが有効応力に及ぼす影響は小さい。それにより、間隙気体圧が土の有効応力状態に与える影響を検討しやすいと考えた。

4.2 供試体作成法

間隙気体を空気、または CO_2 とした供試体の作成法は以下の通りである。

1) 空気供試体

蒸留水を用いて、水中落下法にて作成した。

2) CO_2 供試体

供試体作成モールド内に CO_2 ガスを充満させ、炭酸水を用いて水中落下法にて作成した。その後、供試体上部から負圧にて供試体内の気体を抜き、再び CO_2 圧を供試体に与える作業を3回行った。

4.3 圧密、不飽和化の手順

供試体を作成後、圧密を行い、目標の飽和度と目標の相対密度に合う間隙比を実現する。その後、間隙水圧の定常を確認した後に、間隙気体圧を制御することで間隙水圧を大気圧と等しい値に調整した。その後、非排気状態にし、気体圧の定常を確認した。

4.4 圧密非排気非排水温度変化三軸試験

相対密度 60 %、飽和度 70 % の CO_2 供試体を作成した。間隙気体圧の定常後、常温 $\rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C} \rightarrow 45^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow$ 常温と変化させた時、各段階で気体圧の定常を確認し、等方応力下で温度変化を与えた。

4.5 圧密非排気非排水単調載荷三軸試験

相対密度 60 % で、Grozić³⁾らの研究を参考に飽和度 90 % の、図-2 に示す4つの供試体を作成し、ひずみ速度 0.05 %/min で単調載荷を行った。

Case	間隙気体	温度	基底応力
1	空気	20°C	20kPa
2	CO_2	20°C	
3	空気	20°C $\rightarrow$ 40°C	
4	CO_2	20°C $\rightarrow$ 40°C (非排気非排水)	

図-2 単調載荷試験のケース

5. 試験結果および考察

5.1 温度変化三軸試験

段階的な温度変化に伴う間隙気体圧の変化について、実験値と、ボイル・シャルルの法則から導出した式(3)から得られる理論値を比較し、以下のことがわかった。

1) 温度変化による気体圧の変化は、実験値と理論値で同じ傾向を示した。

2) 実験値の方が理論値より値が小さくなったことから、間隙気体が完全に CO_2 に置き換わっていなかったと考えられる。

5.2 単調載荷三軸試験

図-3 に、主応力差と軸ひずみの関係・有効応力経路を示す。試験結果より、予想した溶解度の影響について次のことがわかった。

1) 温度が一定での影響

図-4 の左のグラフから、 V_{gd0} が大きい CO_2 供試体の方が、体積膨張による気体圧の低下が少ないことがわかる。気体圧定常時の溶解体積 V_{gd0} の違いにより、間隙気相の気体分圧 ($u_g - u_{wv}$) の変化に差が出た。その結果、空気供試体に比べ CO_2 供試体の単調載荷時の有効応力が低くなった。

2) 非排気非排水条件下で温度変化することでの影響

図-4 の右のグラフから、 CO_2 供試体の方が温度上昇時の間隙気相の気体分圧の上昇が多きいことがわかる。これは、溶解度の違いとヘンリーの法則から説明できる。その結果、図-3 の右のグラフから、空気供試体に比べ CO_2 供試体の初期有効応力が低くなったことがわかる。

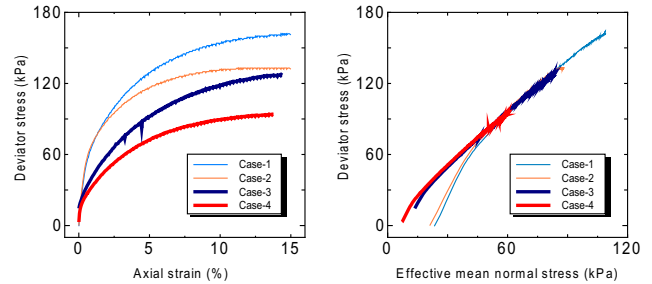


図-3 単調載荷時の、応力-ひずみ関係(左)と有効応力経路(右)

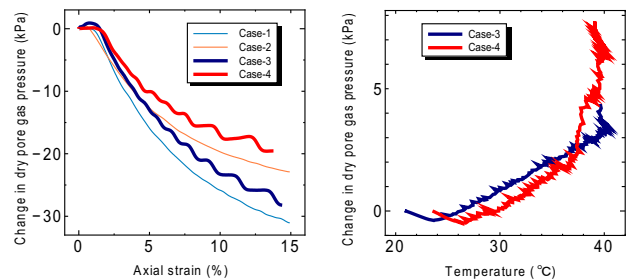


図-4 単調載荷時(左)と温度変化時(右)の間隙気体の気体分圧の変化

6. 結論

豊浦砂を用いて、相対密度 60 %・飽和度 90 % の空気供試体と CO_2 供試体を作成し、非排気非排水状態・等方応力下で温度を制御した単調載荷試験を行った。その結果、以下のことがわかった。

1) 温度変化後の溶解度に対する温度変化前の溶解度の比が大きくなるほど、温度上昇時の有効応力の減少が大きいの。

2) 溶解度の絶対量が大きくなるほど、せん断による体積変化に伴う間隙気体圧の変化が少なくなる。

以上により、 CO_2 供試体の方が温度上昇時の有効応力の減少が大きく、単調載荷時の有効応力が小さくなるため、せん断強度が小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) 国立天文台 編：理科年表 机上版，丸善株式会社，1999.
- 2) 岩淵光生：温度を制御した不飽和砂質土のせん断試験，東北大学修士論文，2008.
- 3) J.L.H.Grozić, S.M.R.Imam, P.K.Robertson, and N.R.Morgenstern : Constitutive modeling of gassy sand behaviour, Can. Geotech. J., 42: 812-829 (2005)