東北大学 学 和田 一彬 フ 風間 基樹 正 渦岡 良介・森 友宏

1. 研究の背景と目的

温度変化による不飽和土の力学的挙動は,廃棄物地 盤・メタンハイドレード地盤のような地盤の力学特性 を検討する上で基礎的な知見となる.土中の間隙の気 相・液相の挙動は,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際の 土骨格の変化による間隙気体の体積や圧力の変化もあ る.さらには間隙気体の水への溶解度によっても変化 する.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の研究は少ない.本研究では, 土骨格の体積変化の影響を際立たせるため,ゆる詰め 供試体を用い,温度上昇を受けた不飽和砂質土の非排 気非排水せん断特性を検討した.

- 2. 有効応力状態と間隙気体の状態変化
- 2.1 不飽和土の有効応力と気体の圧力

不飽和土に作用している有効応力と間隙気体の分圧 は以下ように表される.

$$\sigma' = (\sigma - u_g) + \chi(u_g - u_w) \tag{1}$$

$$u_g = P + u_{wv} \tag{2}$$

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),P:気体の分圧, u_w :間隙水圧, u_{wv} : 水蒸気圧(kPa), χ :サクションパラメータ(本研究で は飽和度 S_r を用いた)である.

2.2 ボイル・シャルルの法則

気体は,物質量の変化がない場合式(3)に示すように,一定質量の体積は絶対温度に比例し,圧力に反比例することが知られている.

$$\frac{(u_g - u_{wv})(V_g + V_{gd})}{T} = constant \tag{3}$$

ここに, V_g :間隙気相の体積, V_{gd} :溶解気体の気相 と見なした時の体積,T:絶対温度である.

この式 (3) に基づけば,体積変化 ΔV ,温度上昇 ΔT が起きた後の定常状態における間隙気体圧は次のよう に表すことができる.

$$P = \frac{(V_{g0} + V_{gd0})}{(V_g + V_{gd} + \Delta V)} \frac{(T_0 + \Delta T)}{T_0} P_0$$
(4)

式中の添え字0は初期の状態量の意味である.

式(4)より,温度上昇後の間隙気体圧は供試体の温 度変化と体積変化から求めることが出来る.

2.3 気体の溶解度

気体の溶解度は溶媒の温度によって変化し,温度の 上昇に伴い気体の溶解度は減少することが知られてい る.気体の分圧が1 atm 下で水1 cm³ に溶解する気 体の体積を標準状態に換算した溶解度曲線を図-1 に 示す¹⁾.この値に間隙水の体積をかけると理論的な溶 解気体の体積 V_{gd} が求まる.



2.4 ヘンリーの法則

ー定温度では一定量の溶媒に溶ける気体の物質量は その気体の分圧に比例する.この関係はヘンリーの法 則として次式で表される.

$$n_{gd} = P \times \frac{V_{gd}}{RT} \tag{5}$$

ここに, n_{gd} :溶解気体の物質量,R:気体定数である.

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 $E(P = u_g - u_{wv})$ に比例する.したがって,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_{qd} が理論的に求められる.

3. 試験概要

3.1 三軸試験装置

本研究で用いた不飽和土三軸試験装置は,次のよう な特徴を持つ.

- ・内セルに敷設したヒーターによりセル水を温めるこ とで,供試体の温度制御が可能.
- ・間隙気体経路に CO₂ ボンベからの経路と真空圧の 経路を繋ぐことにより, CO₂ 圧と真空圧を切り替え ることが可能.
- 3.2 供試体作成方法

本研究では間隙気体に空気と $CO_2 \circ 2$ 種類の気体を 用いて直径5 cm高さ10 cmの供試体を以下に示す方法 で作成した.本研究で用いた試料は豊浦砂($\rho_s=2.643$ g/cm³, $e_{max}=0.980$, $e_{min}=0.606$)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) CO₂ 供試体

あらかじめモールド内に CO₂ を充填し,炭酸水を 用いた水中落下法にて作成した.供試体作成後,負圧 と CO₂ 圧を交互に与えることで,空気を取り除き,液 相・気相に CO₂ を充填する作業を行った.

3.3 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.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.

3.4 試験条件

相対密度 Dr30%, 飽和度 Sr80%の, 表-1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.

表−1 単調載荷試験のケース			
case	間隙気体	温度 (圧密時)	基底応力
1	air	20	
2	CO_2	20	20 kPo
3	air	20 40	JUKIA
4	$\rm CO_2$	(非排気非排水)	

4. 試験結果及び考察

4.1 温度変化による影響

図-2は,圧密時の20 から40 までの間隙圧変 化を示したものである.温度上昇による溶解度の減少 により溶解気体が析出し,間隙気体圧が上昇するが, CO₂供試体の方が間隙気体分圧の上昇が大きくなる. また,CO₂の供試体では40 定温になってからも平 衡に達するまでには時間がかかっていることがわかる.

4.2 せん断による影響

単調圧縮せん断を行った結果,図-3のような間隙 比-軸ひずみ関係が得られた.いずれのケースでもせ ん断初期は間隙比が減少する圧縮挙動をとるが、その 後徐々に間隙比が増加する体積膨張へと転ずる.また, 空気供試体に比べ, CO2 供試体の方が間隙比の増加 量が小さくなっているが,密な供試体における関係²⁾ とは異なる.また, CO₂供試体の40のケースでは 途中で膨張挙動から圧縮挙動に転じたが、これは気体 分圧の上昇により液相へ気体が溶解したことによるも のと考えられる.図-4に有効応力経路を示す.温度 上昇を行ったケースでは,載荷前の有効応力が減少し ているが,軸ひずみ15%の時点でほぼどのケースも 限界状態に乗っているようである.図-5は単調載荷 時の応力--ひずみ関係である.空気供試体の方が CO₂ 供試体よりも,常温の方が温度上昇を受けたものより もせん断強度が大きくなるという結果を得た.

5. 結論

豊浦砂を用いて,目標相対密度30%・飽和度80%の 空気供試体とCO2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,以下のことを確認した.

・空気よりも溶解度の大きい気体を間隙に含むとき, 1) せん断時の体積変化時に有効応力が変化しにくい.

2) 圧密時の温度上昇時に有効応力が減少しやすい.

3) ゆるい砂では体積膨張が小さくなる.

・温度上昇を受けた場合,せん断強度が低下する. 参考文献

- 1) 日本化学会編:化学工学便覧(改訂6版),丸善,1999.
- 2) 勝野悠作他: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,東北大学卒業論文,2009

