

気液二相流体解析による不飽和土の圧密試験挙動の考察  
 An Investigation on consolidation behavior of unsaturated soils  
 with the air-water coupling analysis

木山 正一\*・木村 寛淳・シエムス ケマル\*・青山 咸康\*  
 Kiyama Shoichi・Kimura Hiroatsu・Shemsu Kemal・Aoyama Shigeyasu

**はじめに** 著者らは不飽和土の中圧中型三軸試験装置を開発し、礫質土の圧密コラプス挙動を考察してきた<sup>1)</sup>。既存の実験現象を分析するには、二相流体による圧密解析が必要である。これは間隙空気・間隙水を独立に計測制御する試験機構に由来する。また、礫混合率の増加は、供試体の低飽和化を促し、低飽和土の圧密メカニズムを知る必要がある。ここでは、各間隙流体の連続性の違いに着目し、大きく異なる供試体の飽和度が圧密に与える影響を数値解析的に考察する。

**気液二相流体解析** 実験では間隙流体の境界条件は、供試体上面を排気・非排水、供試体下面を非排気・排水で与える。間隙二流体は不飽和土内部を独立に移動し、圧密が進行する。一次元圧密問題(時間: $t$ , 位置: $y$ )を考えると、各間隙流体の支配方程式は次式となる<sup>2)</sup>。

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = -C_w \frac{\partial u_a}{\partial t} + c_v^w \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} \quad (\text{水}) \dots (1a), \quad \frac{\partial u_a}{\partial t} = -C_a \frac{\partial u_w}{\partial t} + c_v^a \frac{\partial^2 u_a}{\partial y^2} + \frac{c_v^a}{D_a^*} \frac{\partial D_a^*}{\partial y} \frac{\partial u_a}{\partial y} \quad (\text{空気}) \dots (1b)$$

$u_w$ : 間隙水圧,  $u_a$ : 間隙空気圧,  $C_w, C_a$ : 相互作用係数 (間隙二相分の体積圧縮係数などから求まる<sup>2)</sup>),  $c_v^w$ : 間隙水相の圧密係数,  $c_v^a$ : 間隙気相の圧密係数,  $D_a^*$ : 空気伝達係数である。ここで非圧縮性間隙水には Darcy 則, 圧縮性間隙空気には Fick 則を適用する。ところで、不飽和供試体の体積変化はネットストレスおよびサクシジョンの関数である。

$$\frac{\partial (V/V_0)}{\partial t} = (m_{1k}^a + m_{1k}^w) \frac{\partial (\sigma_y - u_a)}{\partial t} + (m_2^a + m_2^w) \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial t} \dots (2)$$

$V$ : 全体積,  $V_0$ : 初期全体積,  $\sigma_y$ : 全応力,  $m_{1k}^*$ : ネットストレスによる体積圧縮係数,  $m_2^*$ : サクシジョンによる体積圧縮係数, 上添え字\*:  $a$  気相,  $w$  水相を表す。ただし、全体積変化は水相および気相の体積変化の和で表されると仮定した。

**問題設定** 排気排水による一次元圧密問題を考える (サクシジョン 50kPa 変化)。ただし、ネットストレス 100kPa が排気状態で負荷され定常状態にあるとする。差分には陽解法を適用した (境界条件等は Fig.1 の通り)。二種類の材料を想定し、それら材料定数は礫質土の既往の実験結果から得られたものである。Case1 は飽和度が 93% と飽和度が大きく間隙水が連続・間隙空気が不連続な土を表す。一方、Case2 は低飽和で間隙流体の連続性は正反対の特徴をもつ。礫混合率が高い材料ほど飽和度が低下する効果を表している。間隙空気は 20 °C の等温過程とする。

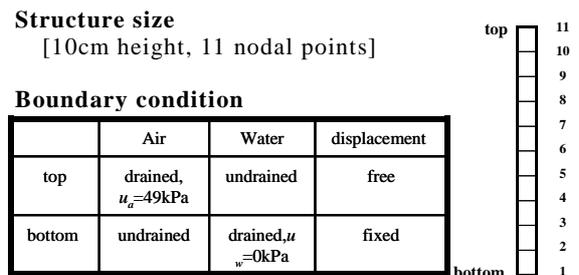


Fig.1 Set problem for consolidation analysis

	Case1	Case2
$m_1^w$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] <sup>-1</sup>	0.0	0.0
$m_2^w$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] <sup>-1</sup>	-9.02E-2	-0.906E-2
$m_1^a$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] <sup>-1</sup>	-4.7E-2	-3.30E-2
$m_2^a$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] <sup>-1</sup>	8.36E-2	-3.14E-2
$k_w$ [cm/s]	2.10E-8	1.20E-9
$D_a$ [cm/s]	1.0E-2	1.0E-2
<b>Sr</b>	<b>0.930</b>	<b>0.198</b>
$n$	0.185	0.347

Fig.2 Material parameter

\*京都大学大学院農学研究科, 西日本旅客鉄道株式会社, \*Kyoto University, West Japan Railway Company, 圧密, 不飽和土, 気液二相流解析

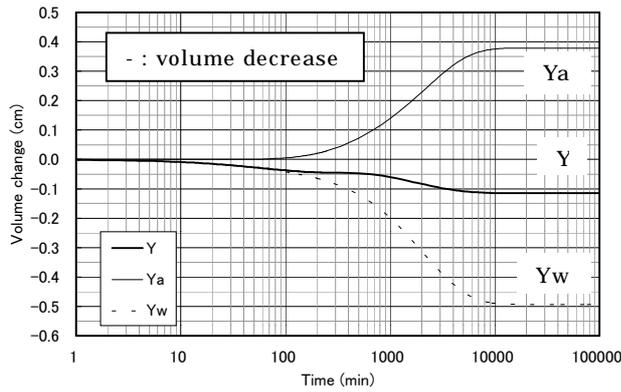


Fig.3 consolidation of Sr=0.930 specimen (Case1)

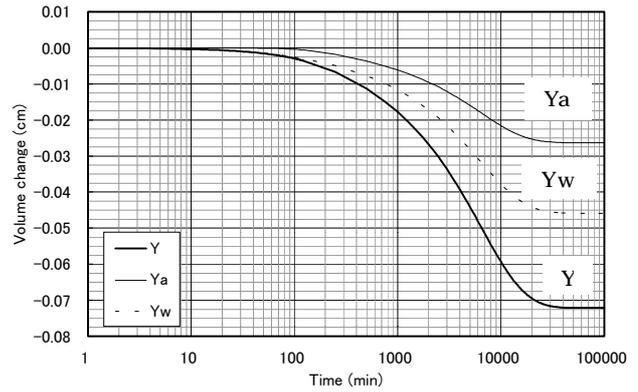


Fig.4 consolidation of Sr=0.198 specimen (Case2)

**考察** Figs.3,4 はそれぞれ Case1,2 について圧密時の全体積 (Y), 間隙空気体積 (Ya), 間隙水体積 (Yw) の変化を表す。両図の全体積変化挙動はよく似ているが、高飽和の場合には相対的に間隙二流体の移流量が大きい。また、低飽和では間隙空気モードが正反対になり、飽和度の違いがもたらす体積変化挙動は多様なことが明らかである。次に圧密中の諸間隙圧・飽和度の空間分布推移を Figs.5,6 に示す。図中の U は圧密度である。高飽和土 (Case1, Fig.5) は間隙二相間の相互作用の影響が大きく、速やかな排水による空気減圧が下部に現われ、上面からの吸気を促進することがわかる。また飽和度の変化も大きく、圧密終了時点での空間分布差も現われやすい。一方、低飽和土 (Case2, Fig.6) では、間隙空気圧の空間分布より、間隙二相間の相互作用は大きく現われていない。むしろ空気圧が上昇するところは、高飽和土にはみられない対照的な挙動である。この事実は圧縮性の空気が連続に分布し、空気流が水流に比べて速やかであることを認識させる。たとえ全体積変化量が同程度であっても、飽和度変化が少ない (低飽和な) 土では圧密完了時の飽和度分布差は少ないようである。このように、一見複雑に思われる不飽和土の圧密現象は、空気・水の連続性に支配されることを認識することで容易に理解できる。

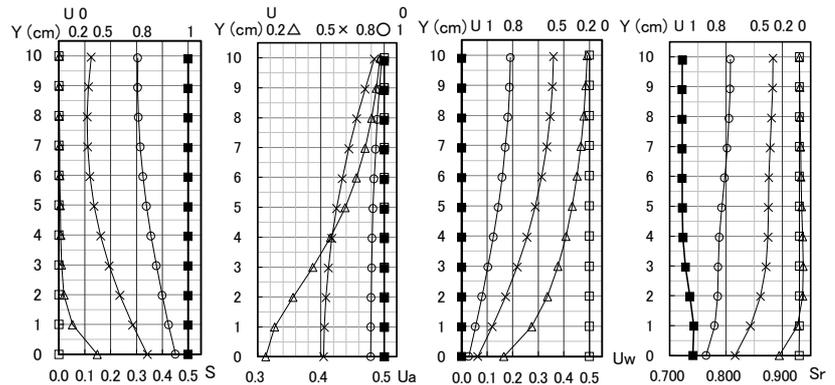


Fig.5 Suction ( $S \times 98\text{kPa}$ ), pore air pressure ( $u_a \times 98\text{kPa}$ ), pore water pressure ( $u_w \times 98\text{kPa}$ ) & Sr distribution of  $S_{ri}=0.930$  sample (Case1)

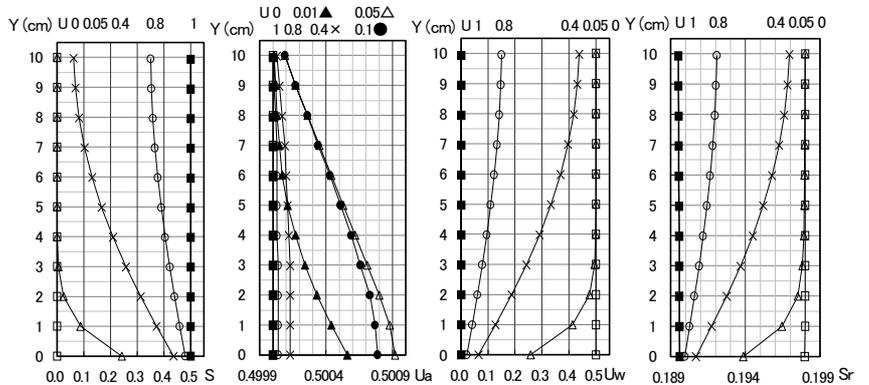


Fig.6 Suction ( $S \times 98\text{kPa}$ ), pore air pressure ( $u_a \times 98\text{kPa}$ ), pore water pressure ( $u_w \times 98\text{kPa}$ ) & Sr distribution of  $S_{ri}=0.198$  sample (Case2)

参考文献 1) 木山, 木村, 青山: 室内試験による不飽和礫質土の圧密・コラプス挙動の一考察, 第37回地盤工学研究発表会(投稿中), 2002. 2) Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.: Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, Inc., 1993.