

非排水条件下での等方応力載荷による不飽和土の変形特性

神戸大学自然科学研究科 学生員 汪 偉川
 神戸大工学部 正会員 河井克之
 神戸大学自然科学研究科 櫻井健一

1. 本研究の目的

飽和土が非排水状態で圧縮される時、外力増分はすべて間隙水に担われて、土骨格に対する有効応力増分は 0 であり、体積変化は生じない。しかし、不飽和土の場合、間隙空気があるため、空気の圧縮あるいは空気の排出によって、間隙比が小さくなり、体積変化が許容される。この時内部応力成分であるサクシオンも変化し、その相互作用については明らかではない。不飽和土中の間隙水は、バルク水とメニスカス水に分類され、それぞれに作用するサクシオンの効果は異なる。バルク水に作用するサクシオンは土粒子骨格を圧縮し剛性を高め、メニスカス水に作用するサクシオンは剛性を高めるだけである。前者をバルク応力、後者をメニスカス応力と呼ぶが、このような間隙水の分類が不飽和土の非排水圧縮時の挙動を表現する術となろう。本研究では不飽和土の非排水等方圧縮試験を行い、その時の変形挙動を測定考察する。

2. 実験装置及び方法

用いた試料は市販のカオリン KS であり、その試料の物理的性質は $G_s = 2.622$, $w_p = 42.6$, $w_L = 72.0$, $I_p = 30.4$ である。含水比調整した試料を突固めとトリミングにより直径 35mm、高さ 80mm に成形し、不飽和土用三軸試験機に設置した。この試験機は、供試体上部から間隙空気圧を載荷することができ、供試体下部のセラミックディスクを介して、吸排水量もしくは間隙水圧を測定できるようになっている。非排水試験においては、与えた空気圧と測定された水圧の差がサクシオンとなる。実験はまず排水条件下で加圧法によりサクシオン履歴を与え、所定のサクシオン・飽和度状態にした後、空気圧を一定に保ったまま非排水条件で等方圧縮した。その時のサクシオンと体積変化を測定した。

3. 実験結果と考察

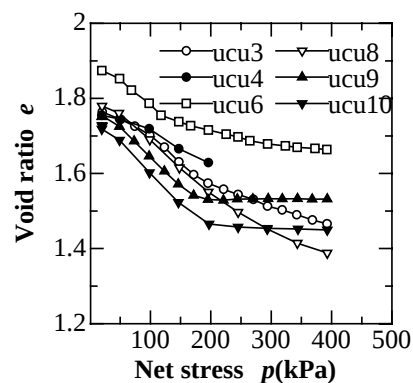
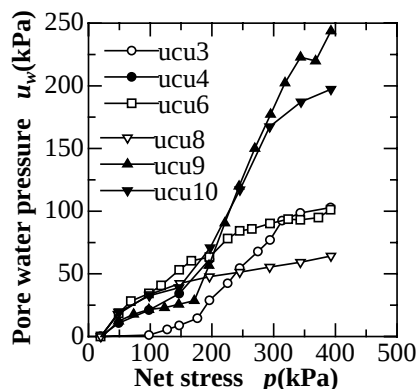
(1) 供試体の状態変化

表-1 は、サクシオン載荷段階終了時の供試体の状態である。図-1, 2, 3 はそれぞれ非排水圧縮段階の供試体の間隙比、間隙水圧 u_w 、飽和度 S_r と net stress p の関係を表している。

各供試体の圧縮性が一様ではないことが読み取れる。これは各供試体のサクシオン載荷段階終了時の状態、つまり非排水圧縮する直前の状態に依存していると言える。図より、供試体 ucu6 の圧縮性が一番低い、これは非排水圧縮する開始時 ucu6 は飽和度が低く、サクシオンが大きい、つまり、剛性を強めるメニスカス応力が大きい状態であるため、土の圧縮性が低いと考えられる。また、非排水段階後半供試体 ucu9 と ucu10 は体積ほとんど変化が見られない、これは、図-2 の間隙水圧の変化

表 1 サクシオン載荷段階終了時の供試体の状態

供試体	空気圧 U_a (kPa)	飽和度 S_r (%)	含水比 w (%)	間隙比 e
ucu3	197	47.0	31.6	1.76
ucu4	197	57.3	38.3	1.76
ucu6	295	42.4	30.0	1.85
ucu8	293	45.4	30.8	1.77
ucu9	197	50.5	33.8	1.75
ucu10	196	52.7	34.5	1.71

図-1 非排水圧縮段階の $e \sim p$ 関係図-2 非排水圧縮段階の $u_w \sim p$ 関係

キーワード：不飽和土、非排水試験、擬似飽和現象、コラプス性圧縮

連絡先：〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

見ると、は圧縮段階の後半において、間隙水圧の増分が、圧縮応力 p の増分とほぼ同じである。このことから、飽和度 60%程度でも、飽和土のように、間隙水が圧縮応力を担って、土の骨格が圧縮しない場合があることが分かる。この現象をここでは擬似飽和現象と呼ぶ。この原因は、以下のように考えられる。不飽和土は非排水状態で載荷によって圧縮するが、間隙の減少に伴う飽和度の増加によって、間隙空気が封入され始める。そのため、ある飽和度に達すると、間隙空気が排出できなくなり、完全に非排水非排気条件になる。この時、間隙空気は完全に間隙水に封入されて、供試体内の間隙水はすべてバルク水と同じような挙動をすると考ええる。軽部の理論によると、間隙水がすべてバルク水の時、土の力学挙動は飽和土と一致すると考えられるから、非排水の場合土の体積は変化しない。

（3）不飽和土非排水圧縮の変形特性

図-4 は非排水等方圧縮段階の $e - \log(p + p_s)$ 関係である。不飽和土の排水等方圧縮試験（サクシオン一定）では、横軸に $p + p_s$ をとると不飽和土と飽和土の圧縮曲線が平行になる結果が得られている。しかし図-4 では飽和土の圧縮曲線よりも不飽和土の圧縮曲線の傾きの方が大きくなっている。これは以下のように考えられる。軽部ら¹⁾は等方圧縮段階の塑性体積ひずみを式(1)で表している。

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_i} \ln \left(\frac{p'_0 + p_m}{p'_{0i} + p_m} \right) \quad (1)$$

ここで、 p_m はメニスカス応力、 p'_{0i} は $e = e_i$ のときの平均有効応力 p'_0 である。式(1)より、間隙比変化は以下のように表される。

$$d(\Delta e) = -\lambda \left[\frac{1}{p + p_s} d(p + p_s) - \frac{a}{(p_{yi} + p_s) + ap_m} dp_m \right] \quad (2)$$

右辺第1項は $(p + p_s)$ による圧縮成分であり、第2項は p_m 減少によるコラプス圧縮である。つまり、サクシオン一定条件下では p_m の変化は小さいため、その影響は現れないが、本研究のようにサクシオン変化がある場合、外部応力による体積圧縮とサクシオン減少によるコラプス性圧縮の和が現れるのだと考えられる。これに擬似飽和現象を適用すると図-5 のようになる。

4. まとめ

不飽和土の非排水圧縮は拘束圧増加による圧縮とサクシオンの減少によるコラプス性圧縮の和となる。そのため、 $e - \log(p + p_s)$ 曲線の傾きは飽和土の排水圧縮試験のものより大きくなる。不飽和土には擬似飽和現象が存在するということが分かった。

参考文献：1) 軽部ら：不飽和土の間隙水状態と土塊の力学的挙動の関係について、土木学会論文集, No.535, pp.83-92.1996.

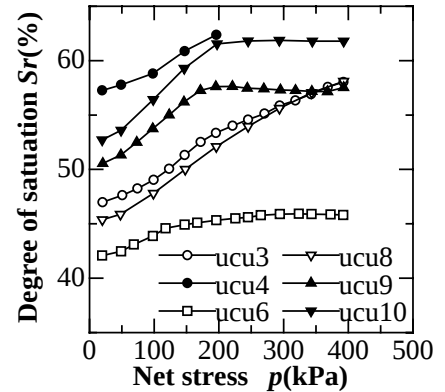


図-3 非排水圧縮段階の $u_w - p$ 関係

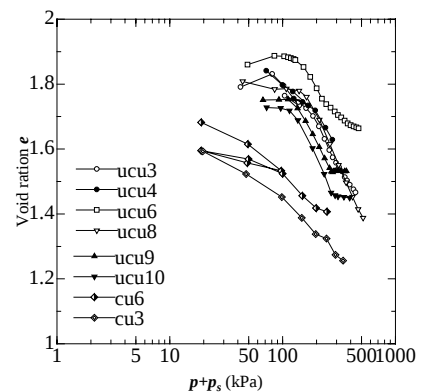


図-4 $e - \log(p + p_s)$ 関係

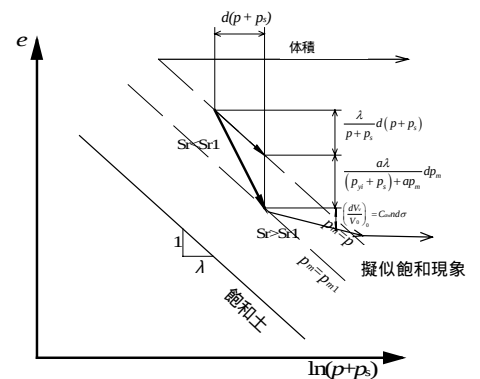


図-5 不飽和土の非排水圧縮特性