

締固め不飽和土の圧密実験 (第1報)

鳥 山 暁 司*

Koushi TORIYAMA

Experimental Study of Consolidation of Compacted Partly Saturated Soil (I)

1. まえがき

締固め粘性土は不飽和土であるため、載荷重は非排水(非排気)状態においても、一部が間隙圧となり、残りは有効応力によって受け持たれる。間隙圧係数 B は飽和度、含水比、体積圧縮係数などによって変化する。さらに生じた間隙圧の消散は間隙空気と間隙水の排出によって生じるが、これらがどの様に排出されるか、明確にされていない。

不飽和土に生じる間隙圧を求める式として Hilf¹⁾ の式が一般に用いられるが、この式では間隙水圧 u_w と間隙空気圧 u_a が等しいと仮定されている。しかし、不飽和土では u_w は一般に u_a より小さく、この差がサクションといわれている。サクションは飽和度あるいは含水比の減少とともに大きくなるが、これが間隙圧と載荷重の関係にどのように影響するかもはっきりしていない。

不飽和土の圧密方程式としては Barden²⁾ および鳥山・沢田³⁾ の式がある。不飽和土に大きな間隙圧が生じ、その消散過程が問題となるのは最適含水比 w_{opt} の湿潤側である。ここでは Barden も鳥山・沢田も間隙空気は孤立気泡として存在し、間隙流体を様な圧縮性流体と仮定し、圧密中、間隙水も間隙空気も排出されるとしている。これに対して、不飽和土の透水試験では飽和度の減少とともに透水係数が低下するが、これは孤立気泡が間隙を閉塞するため透水断面が減少することも一因と考えられており、不飽和土の圧密とは異なったみかたが、間隙空気に対してなされている。

不飽和土の圧密実験は飽和土の圧密実験に比べて影響因子が多いため、ほとんどおこなわれていない。しか

し、フィルダムは盛土の施工が急速におこなわれ、かつ、盛土材料が現場に存在する粘性土や火山灰土をも有効利用するようになってきたため、締固め不飽和土の圧密特性の解明が必要になってきた。そこで、ここでは二重式三軸セル方式による不飽和土の圧密装置を試作し、その概要と実験結果を報告する。

2. 実験装置とその特徴

実験に用いた二重式三軸セルの概要を図-1に示す。不飽和土では間隙中に水と空気が存在し、非排水状態で周圧 σ_3 を加えても、空気が圧縮性のため、供試体に体積変化 ΔV が生じる。一般の三軸セルでは周圧 σ_3 を加えると、セル自体がかなりの膨張をするため、供試体のわずかな体積変化を測定することができない。そこで二重セルとして、内外セルの周圧を同一にし、セルの膨張は外セルでおこなわせ、内セルでは供試体の圧縮量が測定できるようにした。体積変化量 ΔV の測定は三軸セル内への水の出入をペロフラムを用いて測定する体積計でおこなった。内セル、外セルにともに水のみを入れた場合の内セルの体積変化量を測定したが、周圧 σ_3 の増加の際にも、また、 $\sigma_3=6.0\text{kg/cm}^2$ で24時間放置した場合にも、内セルの体積変化は0であった。したがって、締固め土供試体を内セル内の試料台上にセットして測定した体積変化 ΔV は全て締固め土の体積変化と考えることができる。

室内の締固め試験は直径 10cm、高さ 12.7cm のモールドを用いておこなう。このため、圧密試験に用いる供試体も直径 10cm、高さ 12.7cm とした。

不飽和土の間隙中には水と空気が存在し、間隙水圧 u_w と間隙空気が u_a は異なるため、これらを別々に測

* 農業施設工学研究室

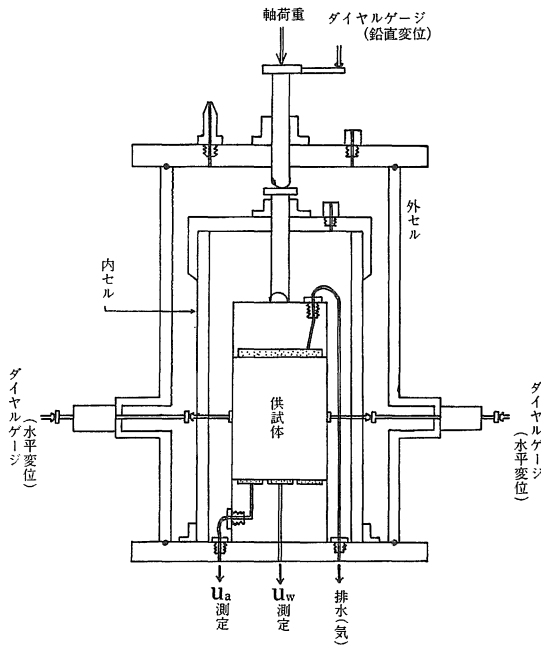


図-1 三軸セルの概要

定することが必要である。このため、三軸セルの試料台の中央部の直径 3cm の部分で u_w を、その外側で u_a を測定することとした。 u_a の測定は在来の粗いポーラス・ストーンを用い、 u_w の測定には微細な素焼きのポーラス・ストーンを用いた。

排水・排気は上部のキャップをとしておこない、三軸セル外に出した後で、空気と水を分離し、排水量と排気量を個別に測定できるようにした。しかし、上部キャップおよび測定ビュレットまでのパイプ内に水または空気が存在し、これがバルブを開いた時に最初に排出される。その後に間隙中の水や空気がビュレットに出てくる。このため、測定された水量と空気量が排出された水量と空気量とならない。この測定法については今後の検討を要する問題である。

供試体は室内ではモールドに試料土を 3 層に入れて、突き固めて作製される。また、現場から採取した乱さない締固め土では、トリマーによって直径 10cm の供試体が切り出される。いずれにしても、供試体の鉛直方向と水平方向で圧縮性に差を生じることも考えられる。そこで鉛直変位と水平変位を測定すれば、この異方性を直接に測定できる。鉛直変位は一般におこなわれている方法で測定する。水平変位はペロフラム・シリンダーを用いて内外圧を等しくし、変位測定部の先端が供試体に大きな接触圧を与えない様な構造になっている。

周圧 σ_3 は調弁弁をとおした一定空気圧を貯水槽をとおして加え、軸圧は重錘および軸圧負荷装置によって加えることができる。また、間隙空気に上部キャップから背圧 u_b を加え、間隙空気圧を一定値に保つことができる。

3. 実験結果と考察

実験に用いた試料土は京都市伏見区深草の藤の森粘土である。この物理的性質を表-1 に示す。

表-1 試料土の物理的性質

液性限界	49.5%
塑性限界	24.6%
塑性指数	24.9%
比重	2.671
砂分	15.5%
シルト分	70.5%
粘土分	14.0%
w_{opt}	24.6%
γ_{dmax}	1.543 g/cm ³

試料土は最適含水比 w_{opt} および w_{opt} の湿潤側に含水比を調整して、1 週間以上置いた後、締固めて実験した。なお、締固め密度 γ_d を小さくし、間隙圧が多く発生するように 3 層 12 回の締固めも用いた。

今回の実験では、周圧 σ_3 と間隙圧 u_a , u_w の関係を主として求め、また、圧密中の間隙空気と水の排出量、間隙圧の変化を測定した。実験は 20°C の恒温室でおこなった。供試体の初期条件を表-2 に示す。

表-2 供試体諸元

供試体番号	w %	γ_d g/cm ³	e	S_r %
No. 1	24.55	1.496	0.785	83.5
2	24.91	1.485	0.799	83.3
3	25.17	1.407	0.898	74.9
4	27.80	1.450	0.842	88.2
5	28.13	1.438	0.857	87.7
6	25.19	1.373	0.945	71.2
7	24.85	1.369	0.951	69.8
8	26.61	1.480	0.805	88.3

周圧 σ_3 と u_a , u_w の関係を図-2 に示す。 $\sigma_3 = 0 \sim 2$ kg/cm² の範囲では $u_a - u_w$ の差は小さく、0.1 kg/cm² 程度であるが、 σ_3 の増加とともに $u_a - u_w$ はやや大きくなる傾向にある。また、No.3 供試体で除荷時の u_a , u_w の変化を測定したがほとんど変化しなかった。飽和土では載荷時も除荷時も $\Delta u = \Delta \sigma_3$ とされているが、不

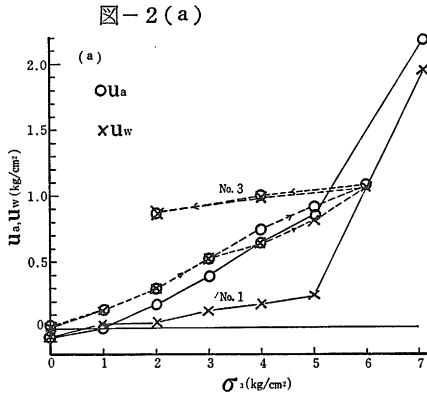


図-2 (b)

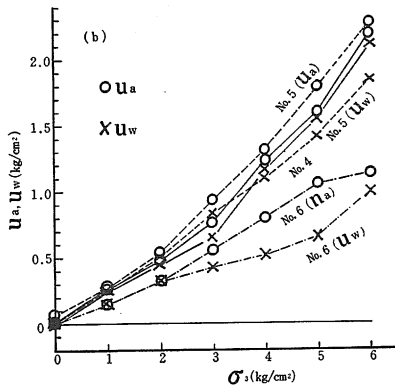


図-2 非排水状態での周圧と間隙圧の関係

飽和土では載荷時と除荷時で間隙圧に差が生じることは大きな特徴といえよう。

不飽和土では周圧 σ_3 を加えた後、時間とともに u_a , u_w が変化する。供試体 No. 2 に $\sigma_3 = 6.0 \text{ kg/cm}^2$ を加えた後の u_a , u_w の変化を図-3 に示す。周圧を加えた後、60~100min まで u_a , u_w は増加しているが、それ以後は減少している。同様の傾向を鳥山・今尾は報告しているが、それに比較して、今回の藤の森粘土では $t \geq 100 \text{ min}$ 以後の u の減少が大きい。これは前回の試料土に比べて、藤の森粘土の液性限界が16%大きいことから、チキソトロピックな構造変化が大きく、これが間隙圧の大きな減少をもたらしたものと考えられる。

不飽和土の間隙水圧の測定において、間隙空気に背圧 u_b を加えて、 $u_a - u_w$ を測定する場合がある。No. 7 供試体で $\sigma_3 - u_b = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ に保って、 σ_3 と u_b を増加した場合の $u_a - u_w$ を図-4 に示す。 u_b の大きさによって、ややばらつきはあるが、 $u_a - u_w \approx 0.1 \text{ kg/cm}^2$ で背圧の影響はほとんど認められない。

非排水状態での間隙圧の推定法を検討するため、No. 8

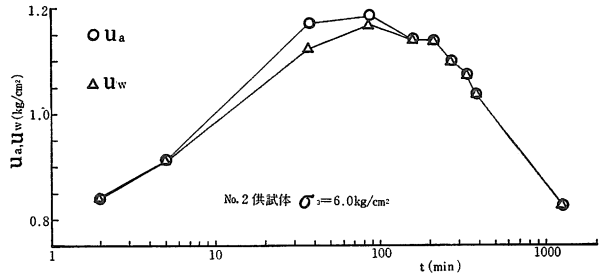


図-3 加圧後の間隙圧の変化

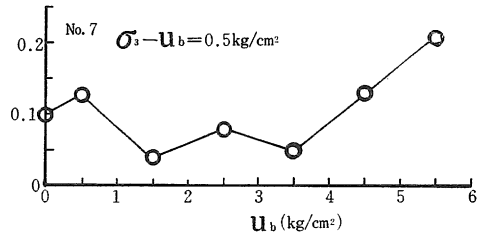


図-4 背圧による $u_a - u_w$ の変化

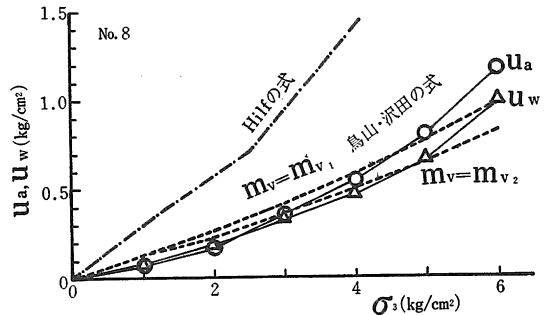


図-5 (a) 周圧による u_a , u_w の変化

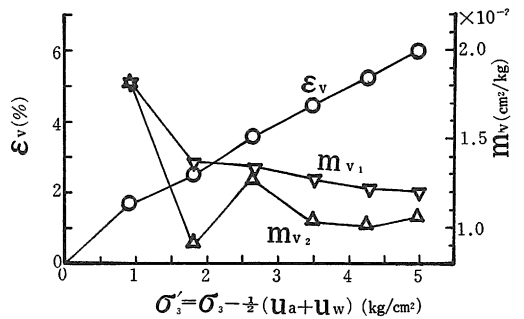


図-5 (b) 有効応力と ϵ_v , m_v の関係

供試体で周圧 σ_3 による u_a , u_w と体積変化 ΔV を測定した。 σ_3 と u_a , u_w の関係を図-5 (a) に示す。また有効応力 σ'_3 として $\sigma'_3 = \sigma_3 - \frac{1}{2}(u_a + u_w)$ とした場合の、 σ'_3 と体積ひずみ ϵ_v および体積圧縮係数 m_v の関係を図-5 (b) に示す。図中の m_{v1} は $m_{v1} = \epsilon_v / \sigma'_3$ で

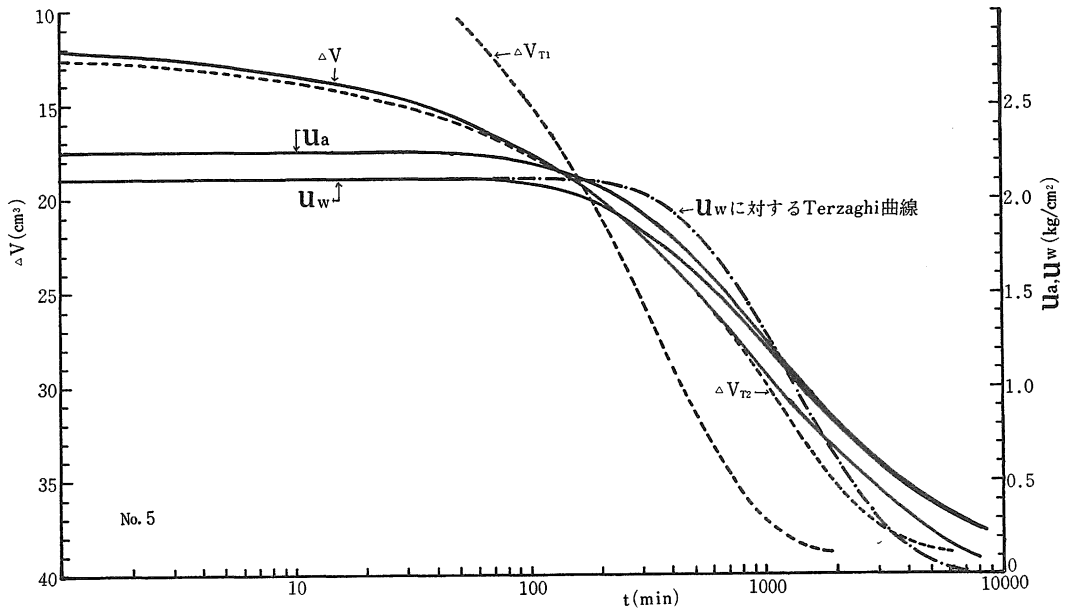


図-6 圧密実験結果と Terzaghi 曲線の比較

求めた値であり、 m_{v2} は各周圧の増加段階ごとの体積ひずみ Δe_v と有効応力の増分 $\Delta \sigma_3'$ より $m_{v2} = \Delta e_v / \Delta \sigma_3'$ として求めた値である。

非排水条件での間隙圧 u と体積ひずみの関係式として Hilf の式がある。この式を変形すると(1)式となる。

$$u = \frac{p_a \epsilon_v}{n_0 \{1 - (1-h) s_0\} - \epsilon_v} \dots\dots\dots(1)$$

ここに n_0 : 締め固め土の初期間隙率

s_0 : 締め固め土の初期飽和度

p_0 : 大気圧

h : 空気の水中への溶解度を表わす Henry の定数 (20°C : $h = 0.0198$)

各 ϵ_v に対する u を(1)式から、また圧密試験での ϵ_v と σ' の関係より各 ϵ_v に対する σ' を求め、各 ϵ_v に対する全応力 $\sigma = u + \sigma'$ が求まる。この結果、 u と σ の関係が得られる。この様にして求めた σ_3 と u の関係を図-5 (a)に示すが、実験値よりも非常に大きな間隙圧を与えている。これは盛土の安定解析上、安全側の間隙圧 u を与えるが、不経済な設計値を与えることになる。

鳥山・沢田は全応力の増分 $\Delta \sigma$ と間隙圧の増分 Δu の関係式を次式で与えている。

$$\Delta u = \frac{m_v (au + p_a)^2}{m_v (au + p_a)^2 + S_0 p_0 (1-a)} \Delta p \dots\dots\dots(2)$$

ここに m_v : 体積圧縮係数

$$a = S_0 (1-h)$$

式(2)では第1回載荷については $u=0$ として、 Δp_1 に対する Δu_1 を求める。ついで、第2回載荷については $u = \Delta u_1$ として、 Δp_2 に対する Δu_2 を求める。これを繰り返すと p と u の関係が得られる。 $m_v = m_{v1}$ と m_{v2} として求めた $p = \sigma_3$ と u の関係を図-5 (a)に示す。計算値と実験値はよく一致している。

圧密中の $\log t$ と体積変化 ∇V 、間隙水圧 u_w 、間隙空気圧 u_a の関係の一例を図-6に示す。排水開始と同時にかなりの量の水と空気 ΔV_0 が排出され、その後、徐々に空気と水が排出される。 u_a, u_w はかなりの間、初期値を保った後に減少を始める。 $\Delta V, u_w$ のそれぞれ50% 圧密点で Terzaghi の圧密曲線を一致させて描いた場合を図-6の点線および鎖線で示す。 ΔV については初期の $t=1$ min までの体積変化 ΔV_0 を圧密過程に加えた場合に対して Terzaghi 曲線を描くと図の ΔV_{T1} 曲線となり、実験値とかけはなれた曲線となるが、 $\Delta V - \Delta V_0$ を圧密過程での体積変化と考えて、これに対して Terzaghi 曲線を描くと図の ΔV_{T2} 曲線となり、実験値に近い曲線となる。ただし、 ΔV_0 として $t=1$ min での ΔV をとったため、初期部分でも Terzaghi 曲線が実験曲線の下側に来た。 $\Delta V, u_w$ の実験曲線は Terzaghi 曲線よりこう配がゆるいが、これは不飽和土の圧密理論から得られた傾向と定性的に一致している。圧密開始時には u_w は u_a より小さい。しかし、圧密の進行にもなると u_a と u_w の差は小さくなり、No.2 と No.6 供試体では圧密後半には $u_a < u_w$ となった。これは間隙空気

が間隙水より早く消散し、土中の間隙水が負のメニスカスを生じて、間隙空気圧より間隙水圧が大きくなったものと考えられる。

4. あとがき

ここでは新しく試作した二重セル式三軸圧密装置の概要とこれによる不飽和土の非排水圧縮および圧密試験結果を示した。これより次のことがいえる。

(1) 二重式三軸セルを用いても供試体の排水面(上面)からピュレットまでの間のポーラス・ストーンおよびパイプが存在するため、排出された水と空気を分離して測定することができない。

(2) 用いた試料土では最適含水比ないし、その湿潤側では間隙水の負圧は小さく、非排水状態で周圧 σ_3 を加えると $u_a - u_w$ はやや大きくなる。

(3) 非排水状態で生じる間隙圧の計算式である Hilf の式は実際よりかなり大きな間隙圧を与える。これに対して、鳥山・沢田の式はほぼ実験値に等しい値となった。

(4) 圧密での u_a 、 u_w の消散および体積変化 ΔV は50%圧密で一致させた Terzaghi 曲線よりゆるやかに進み、不飽和土の圧密理論と定性的に同じ傾向を示す。 ΔV と $\log t$ の関係では、排水と同時に生じる体積変化を無視した方が、Terzaghi 曲線とよく合う。

なお、本研究は昭和56年度文部省科学研究費の補助を受けました。記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1. HILF, J. W. : Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. **3** : 234-240, 1948.
2. BARDEN, L. : Geotechnique **15** : 267-286, 1965.
3. TORIYAMA, K. and T. SAWADA : Soils and Foundations **8** : 63-86, 1968.
4. 鳥山暁司・今尾昭夫 : 島大農研報 **7** : 87-93, 1969.
5. CRONEY, D. and J. D. COLEMAN : Pore Pressure and Suction in Soils : 31-37, 1960 (Butterworths).

Summary

Double cell type triaxial apparatus was manufactured for trial for the purpose of the consolidation tests of compacted partly saturated soils. Using this apparatus, pore water pressure u_w , pore air pressure u_a , volume change ΔV , axial displacement and lateral displacement can be measured for the analysis of consolidation.

Under undrained condition, the increment of u_a and u_w with the increment of confined pressure σ_3 was measured. From the results, $u_a - u_w$ is in the range of 0.1-0.3 kg/cm² for the compacted soil at and wet of optimum moisture content.

It is measured ΔV , u_a and u_w in the process of consolidation. The large volume change ΔV_0 is developed at the same time of drainage. The volume change $\Delta V - \Delta V_0$ is more suitable for the volume change of consolidation than ΔV . Comparing the $u_w - \log t$ curve by experiment for that of Terzaghi's one, the consolidation of partly saturated soil is progressed more slowly than that by Terzaghi's consolidation theory.