

最適含水比以上の締固め不飽和土の一次圧密実験について

鳥山 暁司・今尾 昭夫

Experimental Study on Primary Consolidation of Partly Saturated Soils Compacted Wet of Optimum Moisture Content

Koshi TORIYAMA and Akio IMAO

まえがき

近年、土木機械の発達および社会・経済的な必要性からフィルダムや盛土の建設が速くなっている。我国のように多雨多湿な気象条件下では盛土材料は最適含水比以上であることが多く、そのため盛土内に大きな間げき圧が発生し、これが盛土の安定性や施工速さを支配する重要な要素となっており、この間げき圧の消散工法および間げき圧の発生量とその消散過程の解析法の確立が要求されている。

筆者はすでに最適含水比以上の締固め土についての一次圧密過程を解析するための圧密方程式を導びき、その特性を検討し、さらに2, 3の実験結果を示した¹⁾。しかしこの実験結果には多くの問題点があり、あまり信頼できるものではなかった。そこで今回新たに三軸圧密実験をおこない一次圧密方程式を検討したので、その結果を示す。

1. 締固め不飽和土の圧密方程式の解析結果

飽和土の圧密については Terzaghi²⁾ による圧密理論の発表以来多くの実験的・理論的研究が行なわれている。これに対して不飽和土の圧密は最近までほとんど研究されてこなかった。この理由としては次の事項が考えられる。(a) 不飽和状態は主として締固め土および乾燥土に生じているが、これらの土は飽和した正規圧密粘土に比して圧縮性は小さく、せん断強度が大きい。

(b) 施工機械の未発達のため、締固め盛土の施工速さは比較的遅く、盛土内に生じた間げき圧の大部分が消散する。(c) 盛土が急速に施工される場合は間げき圧は消散しないものとして安全側に考えて設計をした。(d) 間げき圧の測定装置が未発達のため、ほとんど実測例がなかった。

しかし近年、間げき圧の測定装置の改良、短期間での施工などにより締固め土の間げき圧の解析法の確立の重

要性が増してきた。

非排水条件での載荷応力と間げき圧の関係式は Hilf³⁾ および Bishop⁴⁾ によって導びかれており、その適用性については Ellis and Holtz⁵⁾, Holtz and Ellis⁶⁾, Kassiff⁷⁾ の実験的研究によって証明されている。一方、間げき圧の消散過程については Teerawong⁸⁾ により最適含水比以下の場合に対して、Barden⁹⁾ が締固め不飽和土の一般的圧密特性を解析しているが、土の各要素の間げき圧への影響は明らかにされていない。そこで鳥山・沢田¹⁰⁾ は間げき圧が盛土の安定性に大きく影響する最適含水比以上の締固め土の圧密過程を解析して次式を得た。

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = C_{sN} \left\{ \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + D_{sN} \left(\frac{\partial W}{\partial \eta} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$C_{sN} = \frac{K_{sN} W (aW + b)^{1-\mu} [S_0^\mu W^\mu - S_a^\mu (aW + b)^\mu]}{W(aW + b) + M_b} \quad (2)$$

$$D_{sN} = \frac{b \mu S_0^\mu W^{\mu-1}}{(aW + b) [S_0^\mu W^\mu - S_a^\mu (aW + b)^\mu]} + \frac{b}{W(aW + b)} \quad (3)$$

ここに

$$W = \frac{w}{w_0}, \quad \eta = \frac{x}{h}, \quad \tau = \frac{k_0}{m_{v0} h^2 t}, \quad a = 1 - S_0$$

$$b = 1 - S_0 + S_0 H, \quad M_b = \frac{n_0 b}{m_{v0} w_0}, \quad K_{s0} = \frac{1}{1 - S_a^\mu}$$

w : 絶対間げき圧=間げき圧 u と大気圧の和, w_0 : 載荷前の絶対間げき圧, S_0 : 載荷前の飽和度, H : 空気が水中に溶解する際の Henry の定数, h : 粘土層の厚さ, n_0 : 載荷前の間げき率, m_{v0} : 体積圧縮係数, k_0 : 飽和状態での透水係数, S_a : 透水係数が0となる点の飽和度, μ : 飽和度による透水係数の変化を表わす係数。

(1)式を圧密の初期および境界条件で解くには数値計算によった。その結果、不飽和土の圧密では他の条件が等しい場合、(a) 初期間げき圧、すなわち載荷重によ

って生じた間げき圧が大きいほど、(b) 土の圧縮性が大きいほど、すなわち体積圧縮係数が大きいほど、(c) 締め固め土の飽和度が大きいほど圧密ははやく進むことを示した。さらに Terzaghi の飽和土の圧密曲線と比較して圧密はゆっくりと進むことを明らかにした。図-1 に初期間げき圧の圧密曲線への影響とその Terzaghi 曲線との比較を、図-2 に体積圧縮係数の圧密への影響を示す。その他の詳細については文献(16)を参照していただきたい。

ここでは初期間げき圧と土の圧縮性の圧密特性への影響についての実験結果を示す。

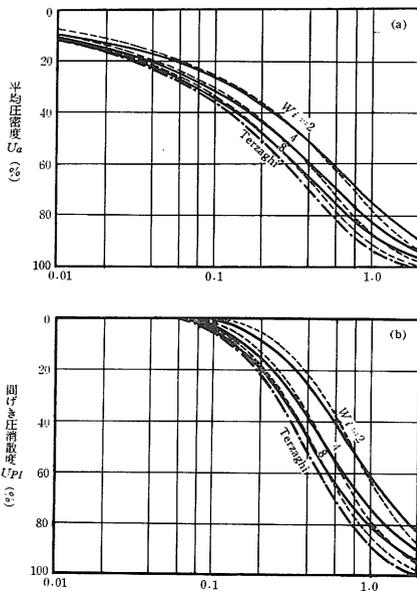


図-1 初期間げき圧の圧密への影響
($S_0 = 0.90, \mu = 3.0, S_a = 0, M_\lambda = 0.5$)
(実線：計算値，点線：修正 Terzaghi 曲線)

2. 試料土および実験方法

実験では土質の圧密への影響もみるために比較的粘質土と砂質土に近い土を用いることとし、粘質土としては大分県宇佐郡に建設された駅館川アースダムのコア用土 (YK 試料) を用い、砂質土に近い試料土としては京都市南部の山科より採取した山土 (山科土) を用いた。これらの試料土の物理特性を表-1 に示す。

実験では上記の試料土を風乾し、 420μ フレイ通過分を用いた。供試体の作製は試料土に所定の含水比となるように一様に水を加え、これをビニール袋に入れて10日以上置いて土粒子への水の吸着を十分におこなわせ、その後 JIS A 1210 の標準圧縮機によって試料土を締め固め、この締め固め土から直径 5 cm の供試体を切り出した。供試体の高さは圧密の大部分が1日で終るようにするため、

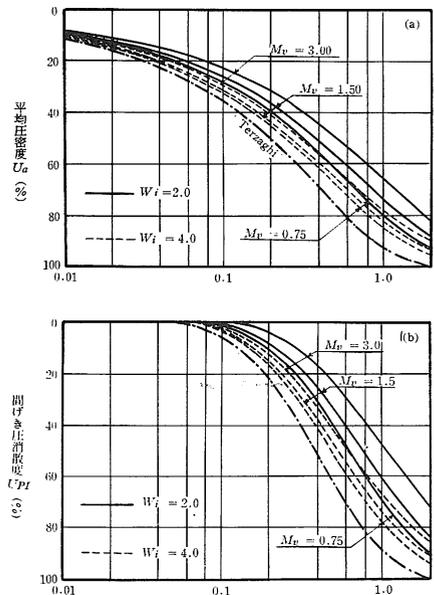


図-2 土の圧縮性の圧密への影響
($S_0 = 0.90, \mu = 3.0, S_a = 0$)

表-1 試料土の物理特性

試料土	山科土	YK 試料
液性限界 %	33.6	66.8
塑性限界 %	22.5	42.2
塑性指数	11.1	24.6
比重	2.69	2.71
最適含水比 %	19.6	36.9

山科土では11~12cm, YK 試料では9~10cmとした。供試体の数はYK 試料で6本, 山科土で5本である。これらの試験前の状態を表-2 に示す。

供試体は作製後ただちに三軸セル内にセットした。この際、空気がゴム膜をとうして三軸セルの水中に逃げる量を減らすためゴム膜は2枚用い、またセル内の水は大気圧下で空気で飽和した状態とした。ゴム膜と供試体の間の空気は手でいねいに排除したが、いくらかの空気が供試体とゴム膜の間に残在した。

圧密はまず供試体に所定の圧力を非排水条件下で加えて間げき圧が十分に生じる30~60分間放置した後、ただちに上部ポーラスストーンをとうして排水をおこない圧密をする場合と、加圧後約1日間非排水状態で放置した後圧密をおこなう場合の2つの方法を用いた。

実験では供試体下部での間げき圧、供試体の鉛直変位

表-2 供試体の初期状態

供試体	YK101~ YK103	YK104~ YK106	山科101~ 山科105
含水比 %	46.0~46.5	40.5~41.0	21.8~22.6
間げき比	1.30~1.33	1.18~1.22	0.66~0.71
乾燥密度 g/cm ³	1.16~1.17	1.21~1.24	1.55~1.62
飽和度 %	94.5~95.5	90 ~ 93	85 ~ 95

および排水量（空気を含む）を測定した。

3. 実験結果

締固め土は不飽和状態にあるため、載荷と同時に全ての間げき圧は生ぜず、図-3に示すように時間とともに増加し、30~60分後に最大値になった後、徐々に減少する傾向を示した。これは不飽和土では載荷重が作用しても土の骨格構造の粘性抵抗により荷重の一部が一時的に受けもたれること、間げき中の空気が間げき水中に溶けこむために時間を要することなどのため、載荷後時間とともに間げき圧が増加し、これが30~60分の時間を要するものと考えられる。土の骨格構造の粘性抵抗は圧密が進むほど大きくなると考えられる。その結果、図-3の山科土の $\sigma_3 = 0 \rightarrow 1.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合と $\sigma_3 = 1.5 \rightarrow 4.9 \text{ kg/cm}^2$ を比較すれば、最大間げき圧に到達するのに再圧密の場合 ($\sigma_3 = 1.5 \rightarrow 4.9 \text{ kg/cm}^2$) の方が長時間を要している。間げき圧は最大値になった後、時間とともに減少しているが、Seed and Chan⁽⁹⁾, Lambe⁽¹⁰⁾ が示しているように、これは土のチキソトロピックな性質により締固め土の構造に変化が生じているためと考えられる。

圧密特性への土の圧縮性の影響は圧密した試料にさらに圧密応力を増加して再圧密する方法で検討した。土は圧密の進行とともに圧縮性は減少し、同一の応力増加量 $\Delta\sigma_3$ により生じる間げき圧の増分 Δu あるいは間げき

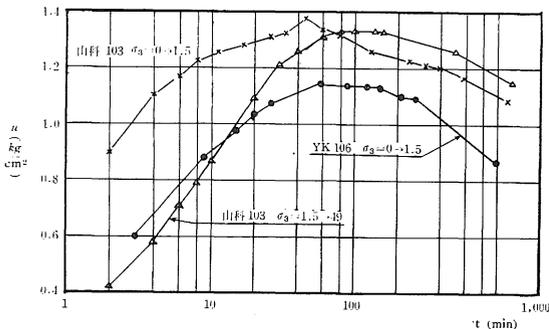


図-3 間げき圧の時間的变化

係数 $B = \Delta u / \Delta\sigma_3$ は減少する。図-4に各供試体の B と圧密応力の関係を示す。ただし、ここで間げき圧の増分 Δu としては圧密終了時に残在している間げき圧 u_{f1} を圧密応力が σ_3 から $\sigma_3 + \Delta\sigma_3$ に増加したときに生じた間げき圧が最大値になった時点の値 u_{i2} から引いた値 $\Delta u = u_{i2} - u_{f1}$ とした。

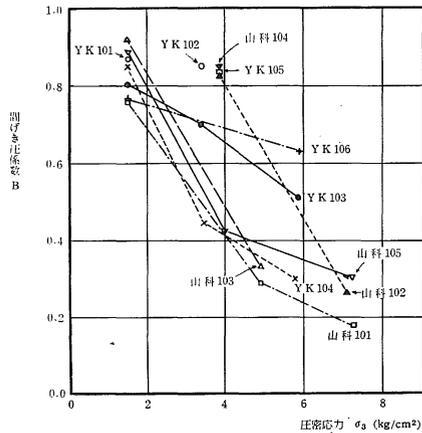


図-4 間げき圧係数 B と圧密応力 σ_3 の関係

圧密曲線は図-5~図-10に示す。図-5はYK試料および山科土で初期間げき圧を約 1 kg/cm^2 と 3 kg/cm^2 とにしたときの間げき圧消散度 U_{p1} と $time\ factor\ \tau_v = t/h^2$ の関係を示す。またそのときの変位に関する圧密度 U_{a1} と $\tau_v = t/h^2$ の関係を図-6に、排水量に関する圧密度 U_{aw} と $\tau_v = t/h^2$ の関係を図-7に示す。ここで U_{p1} は消散すべき間げき圧に対する値をとったため圧密終了時に $0.00 \sim 0.05 \text{ kg/cm}^2$ の間げき圧が残在したため、100%の間げき圧消散はしていない。赤井⁽¹⁾は残留間げき圧が飽和土にも生じることを示しており、これは一次圧密について生じる二次圧密中の排水のための動水こう配および粘土の透水性の特質が原因と考えられる。一方、 U_{a1} , U_{aw} は圧密終了時に変位と排水は終わったものとみなして、この点で $U_{a1} = 100\%$, $U_{aw} = 100\%$ としてデータを整理した。土の圧縮性の圧密への影響は同一供試体を繰り返し圧密して実験したが、この場合の $U_{p1} \sim \tau_v$ の関係を図-8に、 $U_{a1} \sim \tau_v$ の関係を図-9に、 $U_{aw} \sim \tau_v$ の関係を図-10に示す。

4. 実験結果の考察

ここでは最適含水比以上の締固め土の三軸圧密実験をおこなった。

鳥山・沢田⁽²⁾⁽³⁾は標準圧密装置により締固め土の圧密特性への応力増加比 $\Delta p/p_0$ および供試体高さ h_0 の影

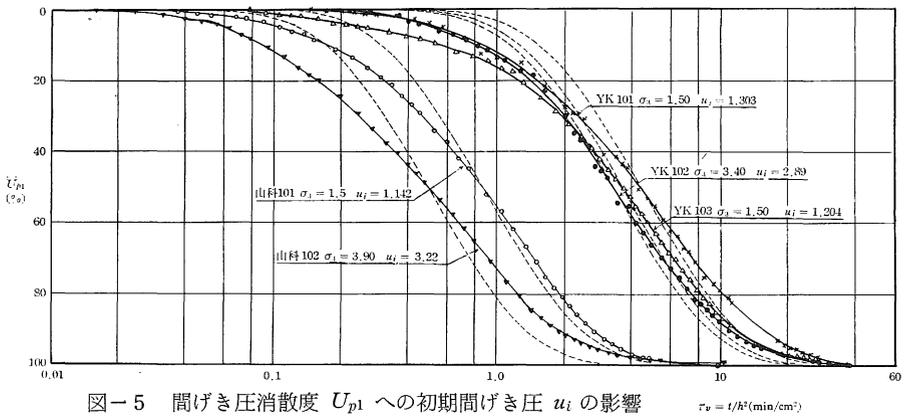


図-5 間げき圧消散度 U_{p1} への初期間げき圧 u_i の影響

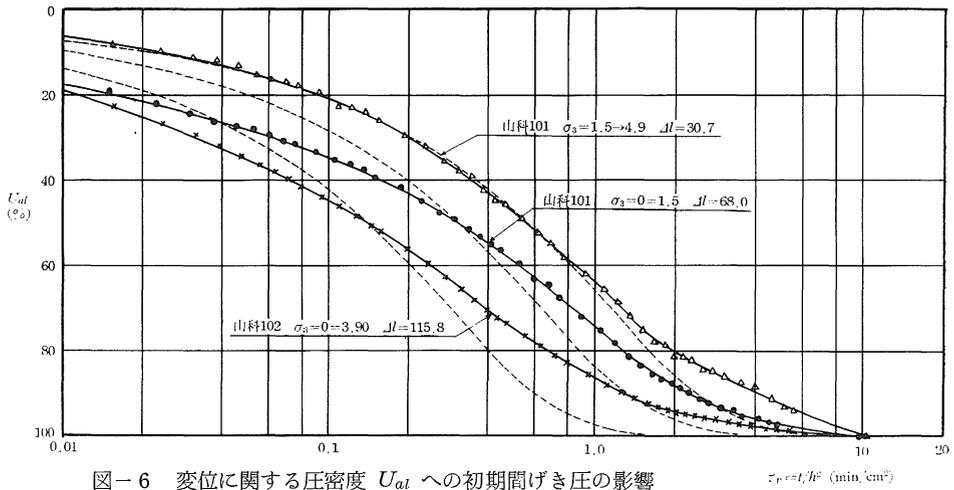


図-6 変位に関する圧密度 U_{ai} への初期間げき圧の影響
(ΔL : 全変位, 0.01mm)

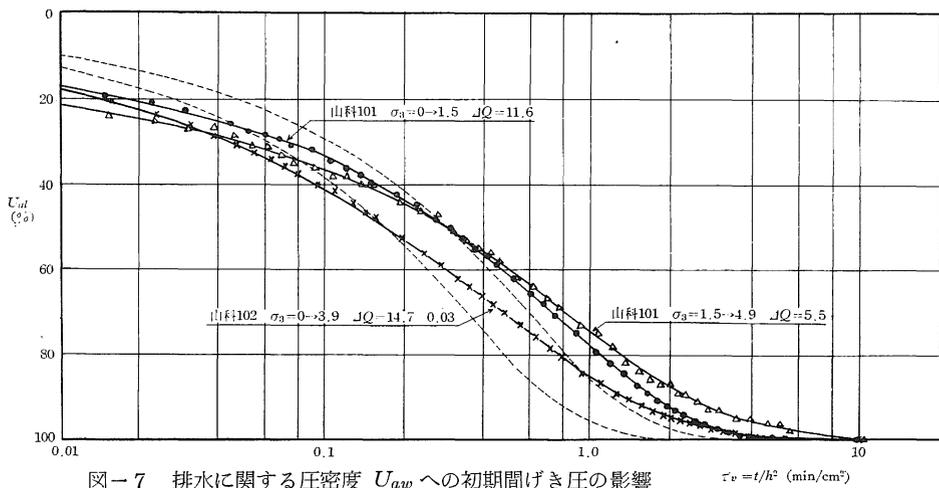


図-7 排水に関する圧密度 U_{aw} への初期間げき圧の影響
(ΔQ : 排水量, cm³)

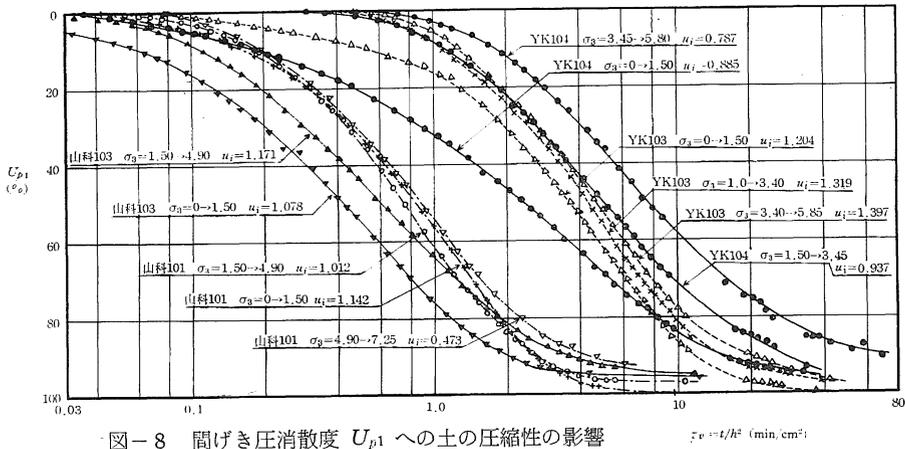


図-8 間げき圧消散度 U_{p1} への土の圧縮性の影響
(u_i : 初期間げき圧, kg/cm^2)

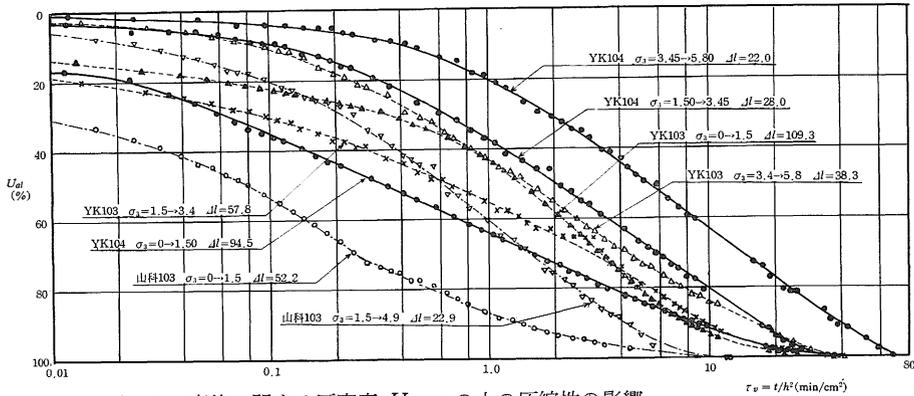


図-9 変位に関する圧密度 U_{al} への土の圧縮性の影響
(Δl : 全変位, $0.01mm$)

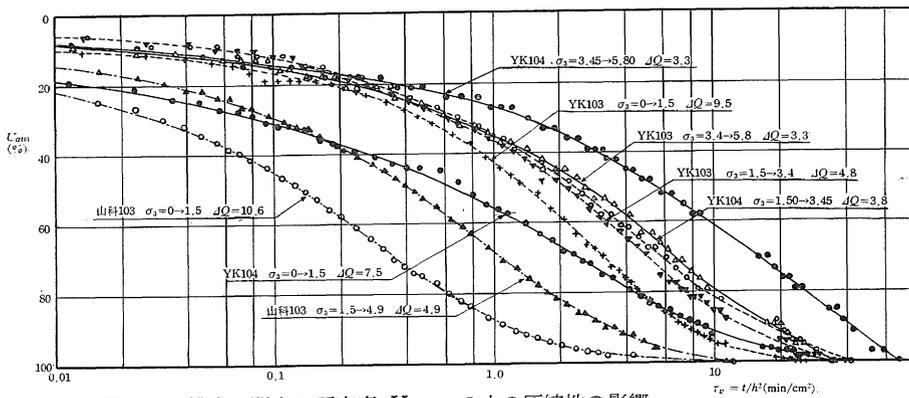


図-10 排水に関する圧密度 U_{aw} への土の圧縮性の影響
(ΔQ : 排水量, cm^3)

響について実験し、 $\Delta p/p_0$ は圧密曲線形に大きな影響を与え、 $\Delta p/p_0$ の大きさによって圧密曲線形は飽和土の圧密曲線について Leonards and Girault⁽⁴⁾ が示していると同じ3タイプに分けられることおよび試料厚さは二次圧密にかなりの影響を与えることを示した。しかし標準圧密装置では載荷と同時に排水が始まるため、載荷重によって生ずべき間げき圧が十分に発生しないうちに圧密は進んでいる。このため圧密特性への各要素の影響を検討することができなかった。

そこで三軸装置を用いて、まず非排水状態で載荷し、間げき圧が十分に発生した後に排水を始めた。非排水状態での間げき圧の変化は図-3に示したように30~60分後に最大値になった後、徐々に減少している。この減少は最適含水比以上の土では締固め時の粘土の骨格構造は dispersed structure であったものが、時間とともに粒子の再配列が生じ、flocculated structure に変化してゆくこと、すなわち土のチキソトロピックな性質が主な原因であろう。この性質の締固め土の圧密およびせん断特性への影響については現在研究中であるが、間げき圧は4~6日間以上減少し、その後一定値になる。このように間げき圧は載荷後、時間とともに変化するが間げき圧が最大値になった時点での間げき圧係数 $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ を図-2に示した。この図から第1回目の載荷時の B は0.8~0.9の範囲にあり、第2回、第3回の載荷での B は第1回目の B の値に比してかなり小さくなっている。またYK101~YK103に比して初期飽和度 S_0 がやや小さいYK104~YK106の方が B はやや小さく、載荷重が大きい方が B はやや大きい。これは非排水条件下での載荷重と間げき圧の関係⁽⁵⁾と同じ傾向である。

初期間げき圧 u_i あるいは圧密応力 σ_3 の圧密特性への影響は図-5~図-7に示したように、 u_i あるいは σ_3 が大きいほど圧密ははやく進んでいる。しかしYK試料では $\sigma_3 = 3.40 \text{ kg/cm}^2$ と $\sigma_3 = 1.50 \text{ kg/cm}^2$ の圧密曲線の差は山科土の $\sigma_3 = 3.90 \text{ kg/cm}^2$ と $\sigma_3 = 1.50 \text{ kg/cm}^2$ の圧密曲線の差に比して小さい。標準圧密試験結果によればYK試料では σ_3 が大きくなるにしたがって、一次圧密に要する時間が長くなり、山科土では σ_3 が大きくなるにしたがって一次圧密に要する時間が短くなることから、圧密中の体積圧縮係数 m_v と透水係数 k の変化が両試料で異なることによるものと考えられる。

Terzaghi の圧密曲線との比較は図-5~図-7に示す。図-1の不飽和土の解析結果で示したように、圧密度50%点で解析結果に一致するように Terzaghi の圧密曲線を修正した場合、Terzaghi 曲線の方が圧密が速く進む。図-5~図-7で実線は実験結果を、点線は圧

密度50%点で実験結果に一致するように修正した Terzaghi 曲線であるが、この図から解析結果と同様の傾向を実験結果が示していることがわかる。しかし不透水面の間げき圧消散度 U_{p1} では $U_{p1} < 50\%$ では実験曲線と Terzaghi 曲線の差が解析結果に比して大きい。これは圧密初期では測定の時間間隔が短かく、わずかの時間の誤差が大きく影響すること、実験装置の特性等によることが考えられる。

締固め土の圧縮性の圧密特性への影響は初期間げき圧 u_i が約 1 kg/cm^2 となるよう $\sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ で圧密した後、さらに $u_i = 1 \text{ kg/cm}^2$ となるよう載荷して圧密を繰返した場合、供試体の圧縮性が減少することを用いて実験した。この結果は図-8~図-10および図-6、7の山科101で示すとおり、圧密応力 σ_3 が $0 \rightarrow 1.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合に比して σ_3 が大きい試料の方が圧密が遅れる傾向を示している。またこれらの実験では圧密中の有効応力の変化量 Δp は間げき圧の消散量に等しく、 $\Delta p = 1 \text{ kg/cm}^2$ である。一方、圧密前の応力 $p_0 = \sigma_3$ は圧密の繰返しごとに大きくなり、したがって応力増加比 $\Delta p/p_0$ は小さくなる。 $\Delta p/p_0$ の $U_{p1} \sim t_0$ 関係への影響は図-8に示すようにほとんどなく、Leonards and Girault⁽⁴⁾ や Barden and Berry⁽⁶⁾ の飽和粘土では $\Delta p/p_0 \leq 1$ では間げき圧の消散は解析結果に比して速く進むという結果とは異なっている。しかし変位と排水量に関する圧密度 U_{al} と U_{aw} の曲線では p_0 が大きくなると、あるいは $\Delta p/p_0$ が小さくなるにしたがって、圧密曲線の終りの部分が100%線に漸近する形から、圧密の初期では圧密はあまり進行せず、後半に大きな変化をしており、Leonards and Girault⁽⁴⁾ が示した Type III に近い曲線形となっている。

粘質なYK試料は砂質の山科土に比して圧密は遅れている。これは砂質土ほど透水係数が大きいためである。

ここで行った実験では試料土を標準突固め方法で締固め、これから5cmの供試体を切り出したが、この方法では供試体にかかなりのばらつきが生じた。今後、供試体の作製方法についても検討する必要がある。また実験の都合上、二次圧密まで実験を続けることができなかったが、この点も今後の課題である。

あ と が き

ここでは最適含水比以上の締固め不飽和土の圧密方程式の解析結果を検討するために三軸装置による圧密実験をした。この結果、初期間げき圧あるいは圧密応力が大きいほど圧密は速く進むが、飽和土に対する Terzaghi の圧密理論に比して間げき圧の変化はゆっくりしてい

る。また体積圧縮係数の影響は同一試料を繰返し圧密することにより実験したが、圧密を繰返し、試料の圧縮性が小さくなると圧密が遅れる傾向を示しており、圧密方程式の解析結果と同じ傾向を示した。しかし圧密方程式中の各係数を決定することはできなかったため、定量的な検討はできなかった。

一方、圧密実験中、締固め土においてもチキソトロピックな特性がかなり土の力学的性質に影響していることがわかった。土のチキソトロピックな特性のせん断および圧密への影響については今後研究してゆく予定である。

最後に本実験を行なうにあたり種々の便宜を与えて下さいました京都大学農学部沢田敏男教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 赤井浩一, 小谷 章, 足立紀尚: 土木学会論文集 **90**: 1-8, 1963
- (2) 鳥山暁司, 沢田敏男: 農業土木学会論文集 **25**: 15-20, 1968
- (3) 鳥山暁司, 沢田敏男: 農業土木学会論文集 **30**: 1969
- (4) Barden, L. *Geotechnique* **15**: 267-286, 1965
- (5) Barden, L. and Berry, P. L.: *Proc. ASCE, Soil Mech. Found. Div.* **91** SM5: 1965
- (6) Bishop, A. W.: *Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths: 38-46, 1960
- (7) Ellis, W. and Holtz, W. G.: *ASTM, STP No.* 254: 62-77, 1959
- (8) Hilf, J. K.: *Proc. 2nd Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* **3**: 234-240, 1948
- (9) Holtz, W. G. and Ellis, W.: *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* **1**: 143-149, 1961
- (10) Kassiff, G.: *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* **1**: 56-61, 1957
- (11) Lambe, T. W.: *Proc. ASCE, Soil Mech. Found. Div.* **84** SM2: paper 1654, 1958
- (12) Leonards, G. A. and Girault, P.: *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* **1**: 213-218, 1961
- (13) Seed, H. B. and C. K. Chan: *Proc. ASCE, Soil Mech. Found. Div.* **83** SM4: paper 1427, 1957
- (14) Teerawong, P.: *One-Dimensional Consolidation of Unsaturated Clay*, Colorado State Univ., Ph. Thesis: 1963
- (15) Terzaghi, K.: *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Lipzig, Deutsche: 1925
- (16) TORIYAMA, K. and SAWADA, T.: *Soils and Foundations* **8**(3): 63-86, 1968

Summary

The great part of load is supported temporarily with pore pressure when the load is applied to compacted soils wet of optimum moisture content. The magnitude and the dissipation process of the pore pressure is an important factor for the stability of earthdams and other earth fills.

The pore pressure, volume of drained pore fluid, and vertical displacement are measured during the consolidation of compacted soils wet of optimum and it is shown that the consolidation of the soils progresses more rapidly as the initial pore pressure or the compressibility of the soils is great.