

# 締固め不飽和土の二次圧密について

## Ⅲ 応力増加比の圧密特性への影響

鳥 山 暁 司<sup>※</sup>

Koshi TORIYAMA<sup>※</sup>

### Secondary Consolidation of Compacted Partly Saturated Soils

#### III. The Influence of Load Increment Ratio on Behaviour of Consolidation

##### 1. ま え が き

筆者は最適含水比以上の締固め土の圧密特性について研究してきた。一次圧密については圧密曲線形は飽和土の圧密曲線と類似している。TERZAGHI 理論では圧密曲線は無次元化した  $time\ factor\ T_v = C_v t / h^2$  に関して一つの曲線形で表わされるのに対して、不飽和土の圧密は初期間げき圧の大きさ、土の体積圧縮係数、飽和度、その他の影響を受けることを解析結果より求め、実験からも解析結果と同じ傾向の圧密特性がえられることを示してきた。<sup>1)2)</sup> 二次圧密に関しては飽和土については多くの研究がなされている。LEONARDS and GIRAULT<sup>3)</sup> は応力増加比  $\Delta p/p_0$  の値によって圧密曲線形は3タイプ

に分類され、 $\Delta p/p_0$  が小さくなるほど二次圧密は圧密曲線で大きな部分をしめることを示し、BARDEN and BERRY<sup>4)</sup> も同様の結果を得、さらに圧密中の間げき圧の測定結果より  $\Delta p/p_0$  が小さい場合、間げき圧の消散は TERZAGHI の圧密理論で推定されるよりも非常に速く進むことを示している。筆者は締固め土の二次圧密特性を実験より求め、これらの結果と飽和土に対する研究結果と比較してきた。<sup>5)</sup> その結果、最適含水比以上の締固め土では圧密曲線は飽和土と同様に3タイプに分類できること、二次圧密速度  $de/d \log t$  は応力増加比の影響をほとんど受けないこと、二次圧密の影響は  $\Delta p/p_0$  が小さくなるほど大きくなることを示した。

しかしこれらの結果は二種の試料土についての実験によるものであり、さらに多くの試料土について実験をおこなう必要がある。ここでは  $\Delta p/p_0$  の圧密曲線への影響、 $de/d \log t$ 、各圧縮比  $R_i$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  と  $\Delta p/p_0$  の関係、土の圧縮性への  $\Delta p/p_0$  の影響についての3種の試料土での実験結果を示す。

##### 2. 実験方法

実験に用いた試料土は鳥根大学構内、深町下池附近および楽山より採取した。

実験にはこれらの試料土を風乾し、0.42mm フルイ通過分を用いた。これは一般に締固め土の圧密実験では2.00mm フルイ通過分を試料土として用いているが、この実験では供試体の均一性をよくするためである。供試体の作製に際しては試料土に最適含水比より数パーセント湿潤側となるように水を加え、ビニール袋に入れて

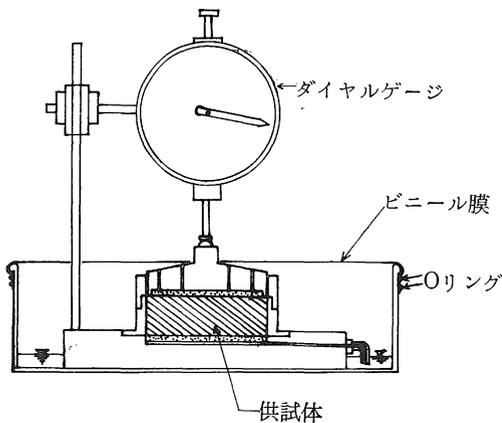


図-1 実験装置

※農業施設工学研究室

数日間以上置き、試料土の水分の吸着および含水比を一様化させた後、JIS A 1210 の標準締め固め方法で締め固め、これから直径 6cm、高さ 2cm の供試体を切りだし実験に用いた。

飽和土では供試体を水中において実験をおこなうため乾燥の心配はないが、不飽和土では供試体を水中に置いた場合、吸水をし土の状態が変化する危険性がある。そこで、ここでは以前<sup>5)</sup>と同様に図-1に示すように圧密容器全体をビニール膜でおおい、容器の底にわずかに水をいれて供試体の乾燥を防いだ。

実験では圧密応力  $p = 3.2\text{kg/cm}^2$  までは応力増加比  $\Delta p/p_0 = 1.0$  で圧密をおこない、 $p = 3.2 \sim 12.8\text{kg/cm}^2$  の範囲で応力増加比  $\Delta p/p_0$  の圧密特性への影響を実験した。これは  $p \leq 3.2\text{kg/cm}^2$  の範囲では圧密荷重が小さく圧密曲線形にばらつきが大きいためである。圧密の一載荷は24時間とした。

表-1に実験に用いた試料土の物理特性および実験前の供試体の含水比、飽和度、乾燥密度を、また図-2には試料土の粒度分布曲線を示す。

### 3. 実験結果

供試体の作製に際しては含水比を一様にするために水を風乾土に加えた後数日以上置き、また締め固めも標準締め固め方法を用いたが、表-1に示すように供試体にはばらつきが生じ、このため  $e \sim \log p$  曲線にもばらつきが生じた。実験に用いた3種の試料土の  $e \sim \log p$  曲線の範囲を図-3に示す。

本実験では応力増加比  $\Delta p/p_0$  の圧密特性への影響を求めた。飽和土の圧密特性への  $\Delta p/p_0$  の影響は多くの研究があり、圧密曲線形については LEONARDS and GIRAULT<sup>12)</sup> が  $\Delta p/p_0$  の大きさにより3タイプに分類している。同様の分類が締め固め土についてもできることを筆者<sup>5)</sup>は示したが、締め固め土では圧密量  $d$  と時間  $t$

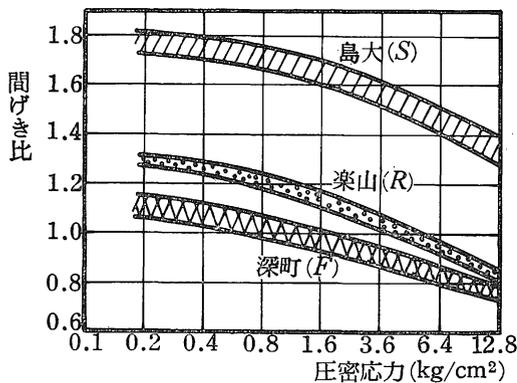


図-3 各供試体の  $e \sim \log p$  曲線の範囲

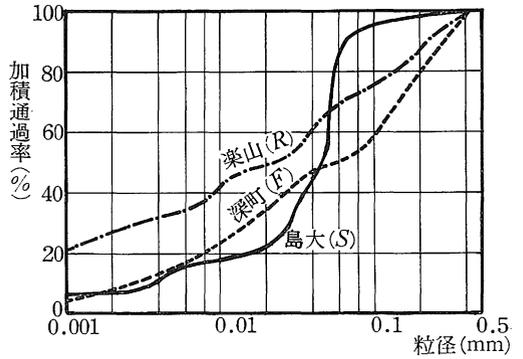


図-2 粒度分布曲線

表-1 試料土の特性

試料土名	島大(S)	深町(F)	楽山(R)
液性限界 %	86.5	43.1	53.2
塑性限界 %	48.2	37.2	39.3
塑性指数	38.3	5.9	13.9
最適含水比%	51.7	30.4	30.7
初期含水比%	60.0~62.0	34.3~35.2	40.0~41.0
乾燥密度 $\text{g/cm}^3$	0.95~0.99	1.22~1.28	1.16~1.20
初期飽和度%	89~94	81~85	81~85

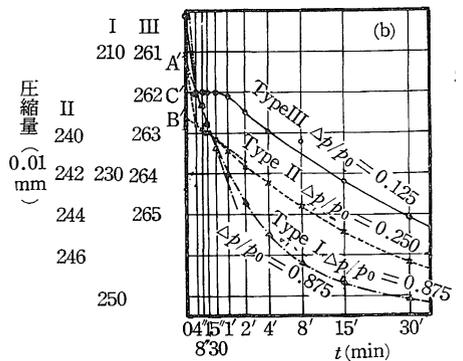
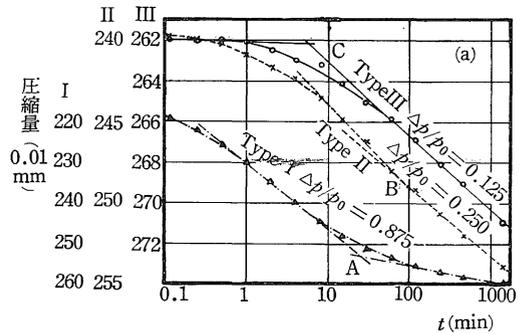


図-4 圧密曲線形の3タイプ

の関係は  $d \sim \log t$  および  $d \sim \sqrt{t}$  プロットした場合、  
 図-4に示すような3タイプに分類したほうがよい。  
 このうち Type I は一般の圧密曲線形をしているが、  
 Type III は全く異なった形をしており、これは  
 LEONARDS and GIRAULT<sup>2)</sup> が飽和土の圧密において  
 Type III としているものに等しい。Type II は Type  
 I と Type III の中間形である。このうち  $\Delta p/p_0$  が小  
 さい場合の Type III では载荷と同時に初期圧縮が生  
 じ、その後圧縮は停止し、さらに数分後にふたたび圧縮  
 が進みます。そして24時間に生じる圧縮量は  $\Delta p/p_0 = 1$

の圧密結果から予想したほどには生じない。このため  
 $\Delta p/p_0$  が小さい場合は  $\Delta p/p_0$  が大きい場合よりも体積  
 圧縮係数が小さくなった。この結果を図-5に示す。こ  
 こでは  $p = 1.6 \rightarrow 3.2 \text{ kg/cm}^2$  の圧密での体積圧縮係数  
 を基準値  $m_{v0}$  にとり、 $m_v$  の代わりに  $m_v/m_{v0}$  をプロッ  
 トした。これは各供試体ごとに  $m_{v0}$  にばらつきがある  
 のでこの影響を小さくするためである。また  $\Delta p/p_0$  の  
 代わりに  $p = 3.2 \rightarrow 6.4 \text{ kg/cm}^2$  と  $p = 6.4 \rightarrow 12.8 \text{ kg/cm}^2$   
 の応力範囲での  $\Delta p$  が等しい2個のデータの平均をと  
 って  $m_v/m_{v0}$  と  $\Delta p$  でプロットした。これは  $m_v$  は  $p$

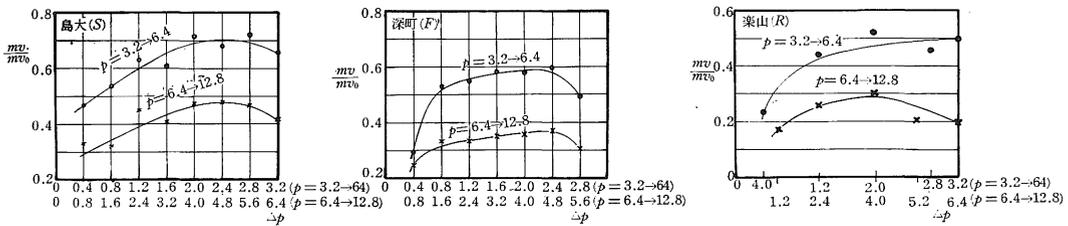


図-5 体積圧縮係数の応力増加による変化

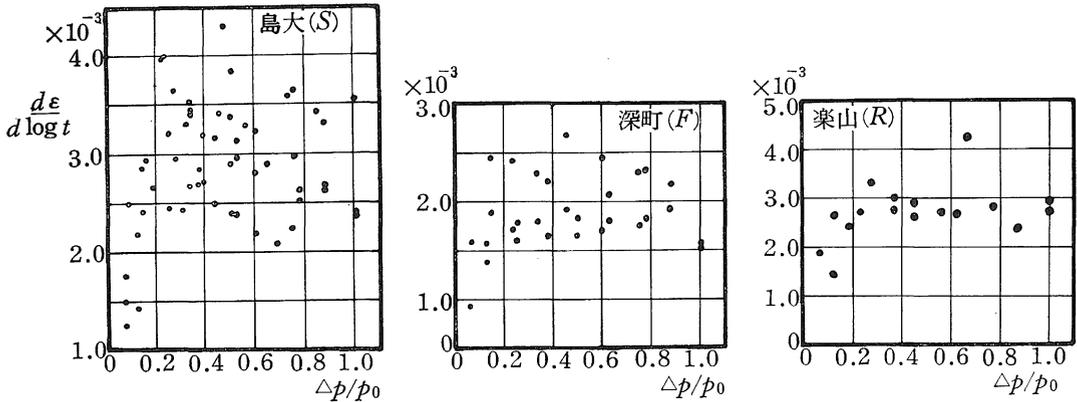


図-6 二次圧密速度  $d\varepsilon/d \log t$  と応力増加比  $\Delta p/p_0$  の関係

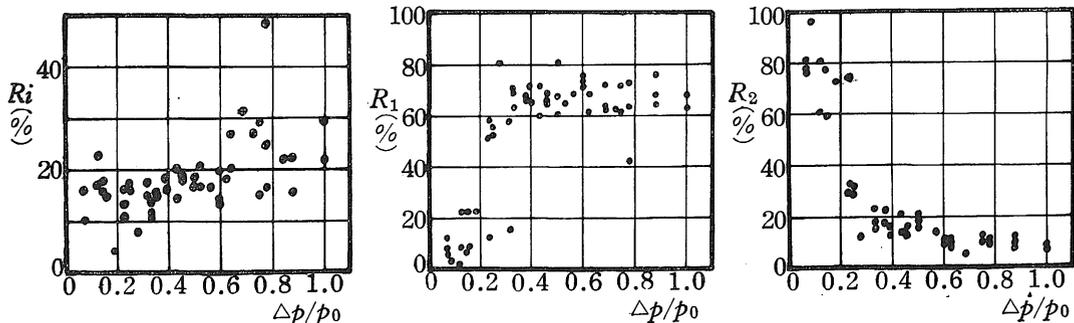


図-7 各圧縮比と応力増加比の関係 (島大試料土)

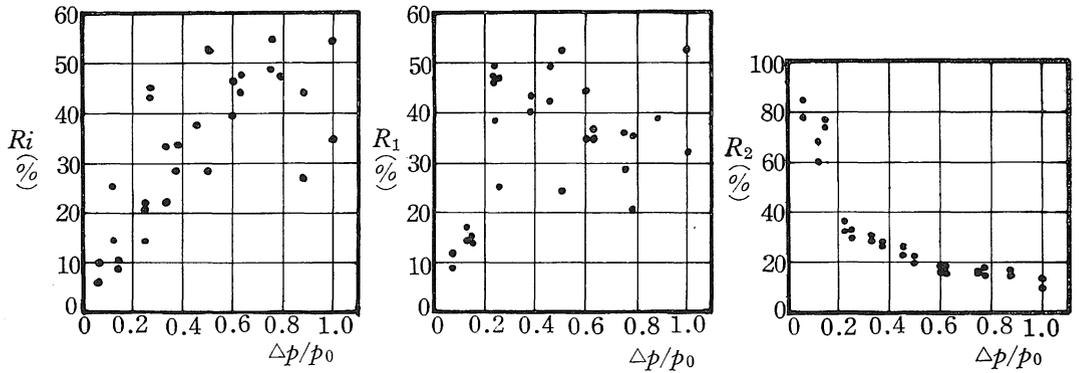


図-8 各圧縮比と応力増加比の関係 (深町試料土)

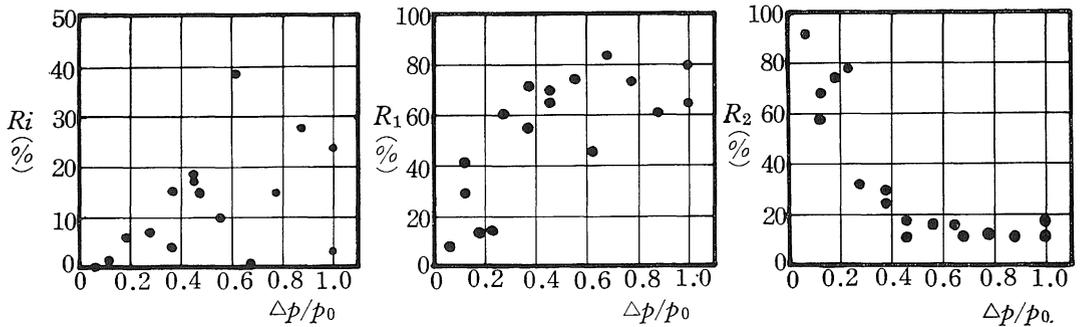


図-9 各圧縮比と応力増加比の関係 (楽山試料土)

が大きくなると感少するが  $\Delta p$  の荷重は  $3.2 + \Delta p$  と  $6.4 - \Delta p$  および  $6.4 + \Delta p$  と  $12.8 - \Delta p$  の方法でおこなったため、両者の平均をとれば  $m_v$  の  $p$  による変化の影響を小さくすることができるためである。この図から  $\Delta p/p_0 < 0.3 \sim 0.4$  の場合、 $m_v$  は  $\Delta p/p_0$  の大きい圧密から予想される値に比して小さな値となることがわかる。

二次圧密速度  $de/d \log t$  および初期圧縮比、 $R_i$ 、一次圧縮比  $R_1$ 、二次圧縮比  $R_2$  への応力増加比  $\Delta p/p_0$  の影響を図-6, 7, 8, 9に示す。ここに  $R_i, R_1, R_2$  は

$$R_i = \frac{\Delta S_i}{\Delta S_t}, \quad R_1 = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_t}, \quad R_2 = \frac{\Delta S_2}{\Delta S_t}$$

$\Delta S_t$  : 一荷重段階で24時間に生じた全圧縮量

$\Delta S_i$  : 荷重と同時に生じた圧縮量を 図-4 (b) に示す  $\sqrt{t}$  法により  $t = 0$  に外そうして、Type I, II, III 曲線に対してそれぞれ A', B', C' 点として求めたもの

$\Delta S_1$  : 一次圧密により生じた圧縮量で 図-4 (a) に示すように100%一次圧密点 A, B, C を求め、こ

の圧縮量から  $t = 0$  の圧縮量を引いた値

$\Delta S_2$  : 二次圧密により生じた圧縮量で24時間圧縮量より100%一次圧密点の圧縮量を引いた値

以上において  $\log t$  を用いて100%一次圧密点を求める方法は 図-4 (a) の Type I, Type II の場合は適用でき点 A, B が求められるが、Type III の場合はここに100%一次圧密点をとるかが問題であるが、ここでも前<sup>5)</sup>と同様に 図-4 (a) の Type III 曲線に引いた2直線の交点 C を100%一次圧密での圧縮量とみなした。これは 図-4 (b) の Type III では荷重後しばらくは圧縮が進まないこと、BARDEN and BERRY<sup>3)</sup> の飽和土に対する圧密実験結果から  $\Delta p/p_0$  が小さいと問げき圧の消散は圧縮に比して非常に速く進むこと、 図-6 の  $de/d \log t$  と  $\Delta p/p_0$  の関係より二次圧密速度は  $\Delta p/p_0$  にほとんど影響されないことが明らかであり、したがって Type III の後半部の直線は二次圧密によるものであるとみなすのが妥当である。

#### 4. 実験結果の考察

応力増加比  $\Delta p/p_0$  の圧密特性への影響は圧密曲線形

にあらわれ、これは図-4のように3タイプに分類できる。Type I は普通の圧密曲線形をしており  $\Delta p/p_0$  が0.4以上の場合の曲線形である。Type III は  $\Delta p/p_0$  が0.2以下の場合に多く  $\log t$  法では一次圧密と二次圧密の区別が前述の通りに困難であり、また載荷後しばらくはほとんど圧縮が進まず、その後、徐々に圧縮が生じ二次圧密部分では  $\Delta p/p_0$  が大きい場合とほぼ同様の圧縮を生じるようになる。Type II は  $\Delta p/p_0$  が0.2~0.4の範囲に多く Type I と同様にして  $\log t$  法により一次圧密と二次圧密を区別することができる。しかし  $\sqrt{t}$

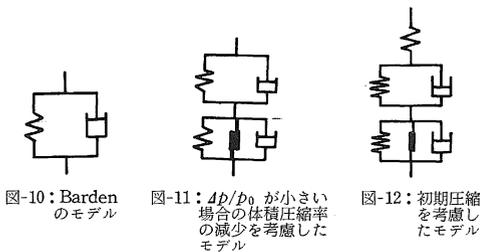


図-10: Barden  
のモデル

図-11:  $\Delta p/p_0$  が小さい  
場合の体積圧縮率  
の減少を考慮した  
モデル

図-12: 初期圧縮  
を考慮した  
モデル

法のプロットでは図-4 (b) に示すように、1~2分後からの圧密曲線のこう配のほうが大きく、これは Type III の初期部分にも圧縮がある程度進む場合と考えることができ、Type II は Type III と Type I の中間形とみなされる。筆者は以前<sup>5)</sup>に Type II としては LEONARDS and GIRAULT<sup>6)</sup>と同じ形の曲線を不飽和土の圧密に対してもとったが、その後の実験結果も合せて図-4の Type II のほうがより一般的である。

BARDEN<sup>7)</sup>は飽和土の圧密曲線形が  $\Delta p/p_0$  によって大きく変化する理由を粘土の骨格構造の粘性抵抗の非線形性にあるとみなし、図-10に示す VOIGHT モデルで粘土の力学モデルを表わし、ダッシュポットの応力-ひずみ関係を

$$\tau^n = B \frac{d\gamma}{dt}$$

として圧密方程式を導びき、LEONARDS and GIRAULT による3タイプの圧密曲線に近い曲線が得られることを示している。図-4に示した締固め不飽和土でも圧密曲線形は3タイプに分けられ、これらは飽和土の圧密曲線形と類似しているから圧密曲線形への  $\Delta p/p_0$  の影響は図-10のモデルで近似的に表わされると考えることができる。

圧密実験によりえられた  $e \sim \log p$  関係をプロットすると  $\Delta p/p_0$  が小さい場合、げんき比の変化が小さく、したがって  $m_v$  が小さくなる(図-4)。  $m_v$  が小さくなる範囲の  $\Delta p/p_0$  は0.3~0.4以下であり Type II、

Type III 曲線の生じる  $\Delta p/p_0$  の範囲となる。  $m_v$  が小さくなる範囲は粘土質の島大試料土のほうが深町、楽山試料土より大きい、このことから図-10に示したダッシュポット成分の一部は降伏値をもち、図-11に示すモデルを粘土の骨格構造を表わすモデルとしたほうがよいと考えられる。このうちスライダの降伏応力  $\sigma_2$  は(0.3~0.4) $p_0$  となる。LEONARDS and ALTSCHAEFFL<sup>6)</sup>は正規圧密粘土を長時間圧密した後  $\Delta p/p_0$  を小さくして圧密をおこなうと粘土はあたかも先行圧密を受けた粘土のような  $e \sim \log p$  関係になることを示し、これを *quasi-preconsolidation* とよんでいるが締固め土では普通の圧密方法でも  $\Delta p/p_0$  が小さい場合 *quasi-preconsolidation* に類似した傾向があることは盛土の沈下問題にも影響し、興味ある現象である。

このように圧密特性は応力増加比により変化する。この原因は土の粘性抵抗によるが、これは二次圧密に最も強く影響する。二次圧密部分のひずみ速度  $de/d \log t$  と  $\Delta p/p_0$  の関係をプロットしたものが図-6である。前の実験<sup>5)</sup>では  $\Delta p/p_0$  を0.15以上にとったため  $\Delta p/p_0$  が小さい範囲での  $de/d \log t$  への影響がはっきりしなかった。そこで今回は  $\Delta p/p_0 = 0.07$  までとり実験した。その結果  $de/d \log t$  は  $\Delta p/p_0$  が0.15以下では小さくなっており、  $\Delta p/p_0 \geq 0.15$  となると実験データのばらつきは大きい、  $de/d \log t$  への  $\Delta p/p_0$  の影響は認められなかった。すなわち  $\Delta p/p_0 \geq 0.15$  では二次圧密速度は圧密応力の増加に無関係になった。このため  $\Delta p/p_0$  が大きくなるほど圧密特性への二次圧密の影響は小さくなる。

応力増加比  $\Delta p/p_0$  の圧密特性への影響を明らかにするため図-7, 8, 9に各試料土の初期圧縮比  $R_i$ 、一次圧縮比  $R_1$ 、二次圧縮比  $R_2$  と  $\Delta p/p_0$  の関係を示す。初期圧縮比  $R_i$  は  $\Delta p/p_0$  が大きくなるにしたがって大きくなっており、この傾向は砂質に近い深町試料土で最も顕著である。一次圧縮比  $R_1$  は  $\Delta p/p_0 < 0.2$  で  $\Delta p/p_0$  とともに急に減少しているが、  $\Delta p/p_0 > 0.2$  ではほぼ一定値をとっている。これに対して二次圧縮比  $R_2$  は  $\Delta p/p_0$  が減少すると大きくなっており、特に  $\Delta p/p_0 < 0.2$  となると圧縮量の大部分は二次圧密として生じている。  $\Delta p/p_0 < 0.2$  における圧密曲線は Type IIIでありこのことから Type IIIが Type I, II とはかなり異なった圧密特性をもつことがわかる。

以上の図-7, 8, 9より不飽和土では載荷と同時に圧縮が生じている。しかるに図-10, 11の土のモデルでは載荷と同時に圧縮は生じない。載荷と同時に圧縮が生じるためには図-12に示すように図-11にスプリングを加えたモデルが適している。ただし初期圧縮比  $R_i$  は

$\Delta p/p_0$  により変化するからこのスプリングは  $\Delta p/p_0$  の関数となる。この図-12のモデルの各スプリングおよびダッシュポットをどのように表わすかは今後の問題である。

### 5. あとがき

ここでは応力増加比  $\Delta p/p_0$  の圧密特性への影響についての実験結果を示した。

圧密曲線形は  $\Delta p/p_0$  の大きさにより 3 タイプに分けられ  $\Delta p/p_0$  が小さくなるほど二次圧密の影響は顕著になる。さらに  $\Delta p/p_0 \leq 0.2$  では飽和土の圧密における *quasi-preconsolidation* と類似の現象がみられ、土の圧縮性が減少する。このことは実際の盛土の沈下量推定にも影響を与え、今後さらに研究すべき問題である。

ここではまた粘土のモデルとして図-12を与えた。しかしこのモデルの各要素は  $\Delta p/p_0$ 、ひずみ速度、圧密応力等により変化するものと考えられ、これらをどのように表わし二次圧密をも考慮した圧密方程式を導びくかは今後の問題である。

最後に本実験は昭和45年度の農業施設工学研究室専攻

生の卒業実験としておこなっているもの一部であり、実験および実験結果の解析は研究室専攻生によるところが多い。ここに専攻生諸君に感謝の意を表します。

### 引用文献

1. TORIYAMA, K. and SAWADA, T.: Soils and Foundations 8 (3): 63-86, 1968.
2. 鳥山昶司・今尾昭夫: 島大農研報 3: 87-93, 1969.
3. LEONARDS, G. A. and GIRAULT, P.: Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1: 212-218, 1961.
4. BARDEN, L. and BERRY, P. L.: Proc. ASCE, Soil Mech. Found. Div. 91 (SM5): 15-35, 1965.
5. 鳥山昶司・沢田敏男: 農土論集 25: 15-20, 1968
6. LEONARDS, G. A. and ALTSCHAEFFL, A. G.: Proc. ASCE, Soil Mech. Found. Div. 90 (SM5): 133-155, 1964.
7. Barden, L.: Geotechnique 15: 345-363, 1965.

### Summary

The characteristics of consolidation of partly saturated soils compacted wet of optimum moisture content is changed with load increment ratio  $\Delta p/p_0$ .

The consolidation curves plotted with  $\sqrt{t}$  and  $\log t$  methods are classified into three types similarly as that of normally consolidated soils. Moreover, the compressibility of compacted soils decreases with the decrease of  $\Delta p/p_0$ . This behaviour is alike as quasi-preconsolidation of normally consolidated soils.

The rate of secondary consolidation  $d\epsilon/d \log t$  is independent on  $\Delta p/p_0$  in the range of  $\Delta p/p_0 \geq 0.2$  but the displacement during consolidation is reduced with the decrease of  $\Delta p/p_0$ , so the influence of secondary consolidation grows with the decrease of  $\Delta p/p_0$ . In the case of  $\Delta p/p_0 \leq 0.2$ , the great part of consolidation is progressed as secondary consolidation.