

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

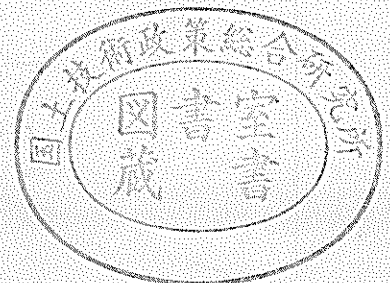
---

VOL. 8

NO. 3

SEPT. 1969

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

Report Nos. 1~15 (1963~1967)

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第8巻 第3号 (Vol. 8, No. 3), 1969年9月 (Sept. 1969)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Re-analysis of Laboratory Data on Wave Transmission over Breakwaters  
..... Yoshimi GODA..... 3  
(防波堤の伝達波高に関する実験値の再整理について.....合田良実)
2. 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第5報)  
——八戸港の津波計算——.....伊藤喜行・谷本勝利・木原 力..... 19  
(Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long-period Waves  
(5th Report) —For the Case of Hachinohe Port—  
..... Yoshiyuki ITO, Katsutoshi TANIMOTO and Tsutomu KIHARA)
3. 造波板の変速運動による発生不規則波のスペクトルについて  
.....合田良実・永井康平..... 47  
(On the Spectrum of Irregular Waves Generated by the Variable Motion of Wave  
Paddles..... Yoshimi GODA and Kohei NAGAI)
4. 粘土試料の攪乱に関する研究 (第2報)  
——不飽和粘土のサンプリングに伴なう応力変化について——  
.....奥村樹郎..... 77  
(Studies on the Disturbance of Clay Samples (2nd Report) —Stress Changes of an  
Unsaturated Clay during Sampling— ..... Tatsuro OKUMURA)
5. 空港舗装用アスファルト材料の耐摩耗性とその試験方法について  
.....赤塚雄三・関 博・小野寺幸夫..... 99  
Abrasion of Asphalt Concrete for Runway Pavement and its Testing Method  
..... Yuzo AKATSUKA, Hiroshi SEKI and Sachio ONODERA)

## 4. 粘土試料の攪乱に関する研究 (第2報)

—不飽和粘土のサンプリングに伴う応力変化について—

奥 村 樹 郎\*

### 要 旨

不飽和粘土のサンプリングに伴う等温的応力変化を Boyle と Henry の法則, Skempton の 間隙圧係数などに基づいて理論的に追跡し, 2, 3 の興味深い特徴が見出された。

(i) 不飽和完全試料の残留有効応力と飽和度は一般に飽和試料の場合よりも小さく, 粘土の体積膨脹係数や飽和度が極端に小さい時は残留有効応力が負になることも有り得る。

(ii) 採取試料を保存中に空気分の移動することを考慮に入れると残留有効応力は非常に小さく, しかも必ず正となる。

(iii) 試料を非圧密非排水試験に供した場合その残留有効応力は拘束圧の増加とともに次第に大きくなり, 完全試料の場合には間隙水圧を原位置での値に揃えることによって完全飽和の場合に一致させることができる。また完全試料の最終残留有効応力は空気分の移動にかかわらず一定である。

---

\* 土質部 土質試験課長

#### 4. Studies on the Disturbance of Clay Samples (2nd Report)

—Stress Changes of an Unsaturated Clay during Sampling—

Tatsuro OKUMURA\*

##### Synopsis

Isothermal changes in effective and pore pressures of a normally consolidated unsaturated clay during perfect sampling were analyzed theoretically on the basis of the Boyle's and Henry's laws and the Skempton's pore pressure parameters, and under some assumptions in considering the difference in pore air and water pressures.

The residual effective stress and the degree of saturation of an unsaturated perfect sample are, in general, smaller than those of a saturated one, and affected by the amount of contained air and the expansibility of the soil skeleton. In extreme cases the residual effective stress is possible to be negative (the pore pressure is positive) when the expansibility or the initial degree of saturation is very small.

Residual effective stresses of an unsaturated perfect sample during storage and UU test were also evaluated. For the stored sample it is always positive and usually very small. For the UU specimen of a perfect sample it is equal to that of a perfectly saturated perfect sample when the pore pressure of the specimen is identical with that of the in-situ sample. The final residual effective stress of a stored UU specimen at a higher confining pressure is same as that of the UU specimen immediately after sampling.

Finally, the above theory was applied to the analysis of the field test results,

---

\* Chief, Soil Test and Investigation Section, Soils Division

## 目 次

要 旨	77
1. ま え が き	81
2. 応力変化の基本式	81
3. 間隙水の圧縮率	82
4. 土粒子骨格の圧縮率と間隙圧係数 $A$	83
5. サンプリングに伴う間隙水圧, 飽和度および間隙圧係数 $B$ の変化	84
6. 完全試料の残留有効応力と飽和度	86
7. 表面張力を無視した場合の解	88
8. 初期飽和の近似解	89
9. 保存試料の残留有効応力と飽和度	91
10. UU 試験における残留有効応力	92
11. 実測との比較	95
12. む す び	97
13. あとがき	97
参 考 文 献	97
記 号 表	98

## 1. まえがき

粘土試料のサンプリングに伴う有効応力の変化については Skempton and Sowa (1963) に始まり, Ladd and Lambe (1963), Noorany and Seed (1965) などの研究がある。またこれに伴う粘土の非排水強度の低下を補正する方法についても古くから多くの提案がなされている(たとえば Seed, Noorany and Smith, 1964)。これに加え著者は前報に簡単に実用的な強度補正法を提案した(奥村, 1969)。しかしいずれの研究においても試料の間隙は水で飽和している, いい換えれば間隙水の圧縮率は土粒子骨格の圧縮率に較べて無視し得るとの仮定に立っている。しかしながら著者等が岡山県錦海湾で採取した試料について残留間隙水圧を実測した経験によると予想外に残留有効応力の小さいことがわかり(松本, 堀江, 奥村, 1969), この原因がすべて機械的な攪乱にあるとは考えられなくなった。一方サンプリングした試料の飽和度が採取深度とともに小さくなるという実測結果もあって(藤下, 1965), 試料の間隙中に気泡のある場合, あるいは間隙水中に空気の溶け込んでいる場合を考慮しないでは通常行なわれる一軸圧縮試験の補正に結び付かないと考えられた。ここではその第1段階として不飽和粘土の応力変化を取り上げ, 気泡を含む間隙水の圧縮率について Schuurman (1966) が考察した成果を応用し, Skempton (1954) の間隙圧係数を用いてサンプリングに伴う応力変化を理論的に追跡し, 試料の間隙水圧, 飽和度および残留有効応力などが空気分のためにどのように変わるかを調べてみた。

## 2. 応力変化の基本式

応力変化に伴う間隙水圧の変化量  $du$  は Skempton (1954) により次式で表わされる。

$$du = B\{\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\} \dots\dots (2.1)$$

ここに

$$B = \frac{1}{1 + \frac{nm_v}{m_s}} \dots\dots (2.2)$$

- $n$  : 間隙率
- $m_v$  : 間隙水の圧縮率または膨脹率 ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )
- $m_s$  : 土粒子骨格の圧縮率または膨脹率 ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )
- $A$  : Skempton の間隙圧係数, 完全サンプリングの場合  $-0.1 \sim 0.3$  (Ladd and Lambe, 1963)
- $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$  : 主応力の変化量 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

不飽和粘土を取り扱う場合間隙圧係数  $B$  は 1 ではなく, しかも応力によって変るものである。一方間隙圧係数  $A$  も一般に常数ではないので (2.1) 式を微分形に直した次式に基づいて考察を進める必要がある。

$$du = B\{d\sigma_3 + A(d\sigma_1 - d\sigma_3)\} \dots\dots (2.3)$$

(2.2) 式を使って (2.3) 式を書き直せば註1,

$$du = \frac{1}{1 + \frac{nm_v}{m_s}} \{d\sigma_3' + du + A(d\sigma_1 - d\sigma_3)\}$$

$$\therefore nm_v du = m_s \{d\sigma_3' + A d(\sigma_1 - \sigma_3)\} \dots\dots (2.4)$$

ここに  $d\sigma_3'$  は最小有効主応力  $\sigma_3'$  の微分である。

原位置における主応力および間隙水圧を  $\sigma_1^0, \sigma_3^0$  および  $u_0$  とし, それぞれが  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_3$  および  $du$  だけ変化して  $\sigma_1, \sigma_3$  および  $u$  になるものとすれば (2.4) 式から次式が成立し,

$$\int_{u_0}^u nm_v du = \int_{\sigma_3^0 - u_0}^{\sigma_3 - u} m_s d\sigma_3' + \int_{\sigma_1^0 - \sigma_3^0}^{\sigma_1 - \sigma_3} m_s A d(\sigma_1 - \sigma_3) \dots\dots (2.5)$$

(2.5) 式から試料の間隙水圧 (したがって有効応力) を両主応力 (またはその変化量) の函数として表わすことができる。

正規圧密粘土について機械的な攪乱のないいわゆる完全サンプリングを行ない, 拘束圧が 0 となった状態を考えると (2.5) 式はつぎのようになる。

$$\int_{u_0}^{u_p} nm_v du = \int_{K_0 \sigma_{v'}}^{-u_p} m_s d\sigma_3' + \int_{(1-K_0)\sigma_{v'}}^0 m_s A d(\sigma_1 - \sigma_3) \dots\dots (2.6)$$

ここに

- $u_p$  : 完全試料の間隙水圧, すなわち残留間隙水圧で, 完全試料の残留有効応力  $\sigma_{v'}$  とは絶対値が等しく符号が逆の関係にある ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$K_0$  : 静止土圧係数

$\sigma_{v'}$  : 原位置での鉛直有効主応力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

過圧密粘土でその過圧密度 (OCR) が大きい場合には  $K_0$  が 1 より大きくなり, (2.6) 式はつぎのように書き替えなければならない。

$$\int_{u_0}^{u_p} n m_v du = \int_{\sigma_{v'}}^{-u_p} m_s d\sigma_3' + \int_{(K_0-1)\sigma_{v'}}^0 m_s A d(\sigma_1 - \sigma_3) \dots\dots (2.6')$$

註1) (2.4) 式を導くには Skempton が (2.1) 式を導いた同じ手法を用いた方が現象的にはよりわかり易いのであるが, 記述の煩雑さを避けるため (2.1) 式を出発点として逆の過程を辿った。

なおサンプリングに伴う応力変化を扱うには軸対称応力で充分と考えられ, 一般化された間隙圧係数 (Skempton, 1960) については考慮しなかった。

なお実際のサンプリングでは Ladd and Lambe (1963) に説明されているように複雑な応力経路を辿り、この時 (2.6) 式に含まれる各係数 ( $n, m_v, m_s, A$ ) が必ずしも可逆的には変化しない。係数の非可逆性を考慮し、応力経路を忠実に辿る積分を行なえば (2.6) 式はそのまま実際のサンプリングにも適用できるが、以下の考察ではその詳細には触れず、応力変化の単純な完全サンプリングに重点を置くこととする。

### 3. 間隙水の圧縮率

気泡を含んだ間隙水の圧縮率は一般に次式で定義される。

$$m_v = -\frac{1}{V_v} \frac{dV_v}{du_v} \quad \dots\dots(3.1)$$

ここに  $V_v$ : 間隙の体積 ( $\text{cm}^3$ )

$u_v = u_a - \lambda(u_a - u)$ : 間隙流体圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$u_a$ : 間隙空気圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\lambda$ : パラメーター (たとえば Barden, Madedor and Sides, 1969)

Sparks (1963) によれば飽和度 85% 以上では間隙内の空気が気泡の形で存在し、相互に繋がってはいないといわれている (Schuurman, 1966)。海底の粘土についてはサンプリングによる変化を考慮しても飽和度が 85% 以下となることは少ないと思われるので、ここでは間隙内の空気が気泡となっている場合を考える<sup>註2)</sup>。この場合間隙流体圧  $u_v$  としては水圧  $u$  のみを取り扱えばよく、前章の基本式はそのままこの場合に当てはまる。また気泡が極く少ない場合を除けば水の圧縮率は無視できるので<sup>註3)</sup>、(3.1) 式はつぎのように書ける。

$$m_v = -\frac{1}{V_a} \frac{dV_a}{du} \quad \dots\dots(3.1')$$

ここに  $V_a$  は気泡の体積 ( $\text{cm}^3$ ) を表わす。また間隙率  $n$  は次式で表わされる。

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \dots\dots(3.2)$$

註 2) 粘土のように板状結晶が卓越し、しかも間隙比の比較的大きい土では間隙内の空気は一層気泡の形になり易いと思われる。

註 3) 水の圧縮率は  $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{kg}$  ていどであり、空気の圧縮率はその時の圧力の逆数である。今水深 40 m の海底を考えると空気の圧縮率は  $1/5 \text{ cm}^3/\text{kg}$  となり飽和度が 99.98% になって始めて空気の圧縮量が水の圧縮量と等しくなる。また空気の圧縮量が水に比べて 1 桁大きい飽和度は 99.8% である。以上のことから水の圧縮率は実際上無視できることがわかる。

ここに  $V$  は試料の全体積 ( $\text{cm}^3$ ) である。

(3.1') (3.2) 式を用いて (2.5) 式の左辺を書き直せば

$$\int_{u_0}^u n m_v du = -\int_{V_{a0}}^V \frac{dV_a}{V} = -\int_{V_{a0}}^V \frac{dV_a}{V_{a0}V_a + V_w + V_s} \\ = -\ln \frac{V_a + V_w + V_s}{V_{a0} + V_w + V_s} = -\ln \frac{V}{V_0} \quad \dots\dots(3.3)$$

ここに

$V_{a0}$ : 原位置での気泡の初期体積 ( $\text{cm}^3$ )

$V_w$ : 間隙内の水の体積, 常数 ( $\text{cm}^3$ )

$V_s$ : 土粒子の体積, 常数 ( $\text{cm}^3$ )

$V_0$ : 原位置での試料の初期体積 ( $\text{cm}^3$ )

なお (3.3) 式で気泡体積の変化量は土の体積に較べて小さいので近似的につぎのように書ける。

$$\int_{u_0}^u n m_v du \doteq -\frac{V_a - V_{a0}}{V_0} \quad \dots\dots(3.3')$$

同様に完全試料の残留間隙水圧  $u_p$  に関しては次式が成り立つ。

$$\int_{u_0}^{u_p} n m_v du = -\int_{V_{a0}}^{V_{ap}} \frac{dV_a}{V} = -\ln \frac{V_p}{V_0} \doteq -\frac{V_{ap} - V_{a0}}{V_0} \quad \dots\dots(3.4)$$

ここに

$V_{ap}$ : 完全試料内の気泡の体積 ( $\text{cm}^3$ )

$V_p$ : 完全試料の全体積 ( $\text{cm}^3$ )

Boyle の法則と Henry の法則とから一定温度では次式が成り立つ (Schuurman, 1966)<sup>註4)</sup>。

$$(V_a + V_a)u_a = (V_{a0} + V_a)u_{a0} \quad \dots\dots(3.5)$$

ここに  $u_{a0}$  は原位置での初期気泡圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) である。ただしこの場合の圧力の基準は真空であり、以下続いてこの基準で考察を進める。また  $V_a$  は溶解空気を取り出してその時の気泡圧力  $u_a$  の値に換算した容積 ( $\text{cm}^3$ ) で、温度が一定ならば常数とみなせるものであり、次式の関

註 4) 実際のサンプリングでは殆んど必ず温度変化を伴う。この場合には Boyle の法則の代わりに Boyle-Charles の法則を用い、また Henry の溶解係数にそのときどきの温度を考慮すればよいのであるが、方程式がかなり複雑となり、さらに粒子骨格の圧縮率と間隙圧係数  $A$  も温度に影響されると考えられるので一層煩雑となる。ここでは簡単のため一定温度のみを対象とした。

(3.5) 式は気泡の溶解または析出が終了して平衡状態となった場合について成り立つもので、応力変化に較べて気泡の溶解 (または析出) 速度が遅い場合には特別の考慮を必要とする。しかし Schuurman (1966) によれば気泡圧と水圧との差が  $0.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、気温が  $20^\circ\text{C}$  の場合気泡の溶解に必要な時間は  $0.1 \text{ sec}$  と計算されている。このことから溶解時間が気泡半径の 2 乗に比例することを考慮に入れても実際問題としては溶解速度の影響は考えなくてもよいと思われる。



係がある。

$$V_d = HV_w \quad \dots\dots (3.6)$$

ここに  $H$  は Henry の溶解係数で  $20^\circ\text{C}$  において約 0.02 である。

間隙水圧  $u$  と間隙空気圧  $u_a$  との関係は次式で表わされる (Schuurman, 1966)。

$$u = u_a - \frac{2q}{r} + u_a' \quad \dots\dots (3.7)$$

ここに

$u_a'$ : 飽和蒸気圧 (kg/cm<sup>2</sup>)

$q$ : 表面張力, 水と空気の場合約  $7.4 \times 10^{-5}$  (kg/cm)

$r$ : 気泡の半径 (cm)

飽和蒸気圧  $u_a'$  は W.J. Beek により次式で表わされる (Schuurman, 1966)。

$$u_a' = u_a \left( 1 - \frac{2q}{u_a r} \frac{V_{mw}}{V_{ma}} \right) \quad \dots\dots (3.8)$$

ここに

$u_a$ :  $20^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ kg/cm}^2$ ,  $r = \infty$  での飽和蒸気圧, 約  $0.02 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

$V_{mw}$ : 水の molecular volume, 約  $18 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kmol}$

$V_{ma}$ :  $20^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ kg/cm}^2$  における空気の molecular volume, 約  $24.2 \text{ m}^3/\text{kmol}$

(3.8) 式を (3.7) 式に代入すれば,

$$u = u_a - \frac{2q}{r} \left( 1 + \frac{u_a}{u_a} \frac{V_{mw}}{V_{ma}} \right) + u_a \quad \dots\dots (3.9)$$

ここで  $V_{mw}/V_{ma}$  は  $10^{-4}$  のオーダーであり,  $u_a/u_a$  は  $10^{-1}$  のオーダーなので (3.9) 式はつぎのように簡略化できよう。

$$u = u_a - 2q/r + u_a \quad \dots\dots (3.9')$$

気泡はほぼ等しい半径の状態では分布していると考えられるから (Schuurman, 1966), その数を  $N$  個とすれば,

$$V_a = \frac{4}{3} \pi r^3 N \quad \dots\dots (3.10)$$

したがって応力変化に伴う気泡数の増減がないものとすれば次式が成り立つ<sup>註5)</sup>。

$$\frac{r_0}{r} = \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} \quad \dots\dots (3.11)$$

註 5) 気泡の数が変わらないとの仮定には問題が多い。しかし著者の知る限りではその増減についての詳細は明らかでなく, 現段階ではこれを考慮に入れることはできない。しかしながら, 溶液から結晶が析出する場合あるいは水蒸気が固化する場合等との類似性を考慮することにより, 飽和状態から気泡の析出する不安定領域を除けば気泡の数が変わらないとすることは一応許される仮定であると考えられる。

ここに  $r_0$  は原位置における気泡の初期半径 (cm) である。(3.5) および (3.11) 式を (3.9') 式に代入すれば気泡体積  $V_a$  と間隙水圧  $u$  との関係が次式で与えられる。

$$u = \frac{V_{a0} + V_a}{V_a + V_a} u_{a0} - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots (3.12)$$

同様に原位置での初期状態では (3.9') 式から

$$u_0 = u_{a0} - 2q/r_0 + u_a \quad \dots\dots (3.13)$$

(3.12) 式と (3.13) 式から  $u_{a0}$  を消去すれば最終的に  $V_a$  と  $u$  との関係として次式が得られる。

$$u = \frac{V_{a0} + V_a}{V_a + V_a} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_a \right) - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots (3.14)$$

(3.14) 式は真空を基準とした圧力を使って導いたものであるが, 一般に用いられる大気圧基準でも成り立つことが容易に確かめられる。ただしこの場合には飽和蒸気圧  $u_a$  も大気圧基準とする必要があり, 通常は負の値となる。

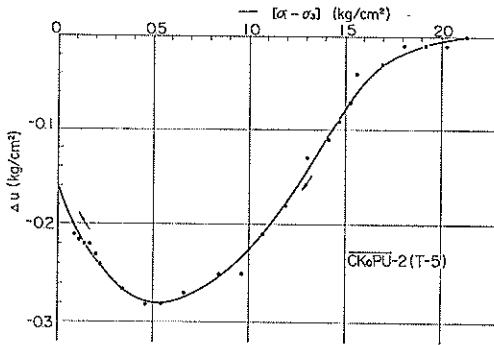
#### 4. 粒子骨格の圧縮率と間隙圧係数 $A$

サンプリングの過程で有効主応力  $\sigma_3'$  は概ね減少する方向にあり, 一時的に増加することがあっても原位置での値を超えることは稀であると思われる。すなわち圧密現象という膨潤と再圧密との過程を往き来するものとして差し支えあるまい。この間に採るべき圧縮率  $m_s$  の詳細は明らかではないが, 圧密時の体積圧縮係数より1桁小さく, またその値はほぼ一定であるとしても実用的には差し支えないであろう。

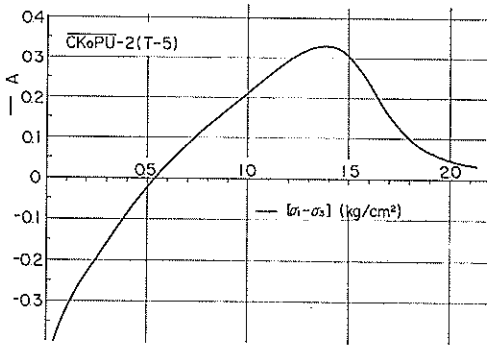
これに反し間隙圧係数  $A$  の値はサンプリングの過程で大きく変化する。図-1 は Boston Blue Clay についての三軸試験機による完全サンプリングの一例であり (奥村, 1969), (a) 図は軸差応力と間隙水圧との関係を, (b) 図はその勾配として定義された間隙圧係数  $A$  と軸差応力との関係を示したものである。この例からも判るように間隙圧係数をサンプリングの全過程に亘って一定とするわけには行かない。ただし (2.5) 式に示された軸差応力の変動範囲内での平均値  $\bar{A}$  を次式で定義しておくことと便利である。

$$\bar{A} = \frac{\int_{\sigma_1^0 - \sigma_3^0}^{\sigma_1^1 - \sigma_3^1} A d(\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sigma_1^1 - \sigma_3^1) - (\sigma_1^0 - \sigma_3^0)} \quad \dots\dots (4.1)$$

同様に完全サンプリングにおける平均値  $\bar{A}_p$  を次式で定義しておく。



(a) 軸差応力と間隙水圧との関係



(b) 軸差応力と間隙係数Aとの関係

図-1 完全サンプリングにおける間隙係数Aの一例 (Boston Blue Clay)

$$\bar{A}_p = \frac{-\int_0^{\sigma_1 - \sigma_3} Ad(\sigma_1 - \sigma_3)}{(1 - K_0)\sigma_{v'}} \dots (4.2)$$

以上の条件を(2.5)式の右辺に適用すると次式が得られる。

$$\int_{\sigma_3^0 - u_0}^{\sigma_3 - u} m_s d\sigma_3' + \int_{\sigma_1^0 - \sigma_3^0}^{\sigma_1 - \sigma_3} m_s Ad(\sigma_1 - \sigma_3) = m_s \{ \Delta\sigma_3 - \Delta u + \bar{A} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \} \dots (4.3)$$

ただし

$$\Delta\sigma_3 = \sigma_3 - \sigma_3^0$$

$$\Delta u = u - u_0$$

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1^0 - \sigma_3^0)$$

同様に完全試料に関しては(2.6)式からつぎのようになる。

$$\int_{K_0\sigma_{v'}}^{-u_p} m_s d\sigma_3' + \int_{(1-K_0)\sigma_{v'}}^0 m_s Ad(\sigma_1 - \sigma_3) = -m_s [u_p + \sigma_{v'}' \{ K_0 + (1 - K_0)\bar{A}_p \}] \dots (4.4)$$

### 5. サンプリングに伴う間隙水圧、飽和度および間隙係数Bの変化

前2章で明らかにされた関係を応力変化の基本式(2.5)に適用し試料の間隙水圧、飽和度および間隙係数Bの値を求めてみよう。

(3.3')式と(4.3)式とを(2.5)式の関係によって等置し、試料の間隙水圧uについて整理すれば次式が得られる。

$$u = u_0 + \Delta\sigma_3 + \bar{A} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) + (V_a - V_{a0}) / (m_s V_0) \dots (5.1)$$

この時の気泡体積V<sub>a</sub>を知るために(3.14)式と上式を等置すると次の条件式が得られる。

$$\frac{V_{a0} + V_a}{V_a + V_a} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_d \right) - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} - \frac{V_a - V_{a0}}{m_s V_0} - \Delta\sigma_3 - \bar{A} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - u_0 + u_d = 0 \dots (5.2)$$

(5.2)式に現れる各係数のうちV<sub>a0</sub>, u<sub>0</sub>, r<sub>0</sub>およびV<sub>0</sub>は初期条件であり、V<sub>a</sub>, q, u<sub>d</sub>, m<sub>s</sub>および $\bar{A}$ は常数とできるから、最小主応力の変化量Δσ<sub>3</sub>と軸差応力の変化量Δ(σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub>)を規定することにより未知数V<sub>a</sub>を数值的に解くことができ、(5.1)式からその時の間隙水圧を知ることができる。すなわち(5.1)および(5.2)式が試料の間隙水圧を与える解である註6。

一般に試料の飽和数Sは次式で表わされ、

$$S = \frac{V_w}{V_a + V_w} \dots (5.3)$$

(5.2)および(5.3)式がこの場合の解となる。

つぎにサンプリング中の間隙係数Bの変化を知るために(2.2)式に立ちもどろう。(3.1')および(3.2)式を(2.2)式に代入すれば次式が得られる。

$$B = \frac{1}{1 - \frac{1}{m_s V (du/dV_a)}} \dots (5.4)$$

(3.14)式をV<sub>a</sub>について微分すれば、

$$\frac{du}{dV_a} = - \frac{V_{a0} + V_a}{(V_a + V_a)^2} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_d \right) + \frac{2q}{3r_0 V_a} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} \dots (5.5)$$

註6) (5.2)式は7次方程式に相当し、物理的に意味のない虚根や負の実根を別としても、V<sub>a</sub>>0の範囲で2つの実根がある。このうちの1つは(5.2)式第2項の値がV<sub>a</sub>=0で-∞となるためのもので、これについては8章で改めて考察するが、通常のサンプリングで初期気泡体積が0でない場合には採り上げる必要のないものである。

であるから (5.2), (5.4) および (5.5) 式が間隙圧係数  $B$  を与える解となる。

以上で得られた間隙水圧, 飽和度および間隙圧係数  $B$  についての解はサンプリングの過程を念頭に置きつつも, より一般的な形で求めたので, 一般の応力変化についても当てはまるものである。むしろサンプリングにおいては側圧  $\sigma_3$  および軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  が減少する方向にあるので  $\Delta\sigma_3$  および  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  が負の値となることに注意しなければならない。

サンプリングの過程が進み  $\Delta\sigma_3$  および  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  の絶対値が大きくなると (5.2) 式において第4, 第5項は増加して行く。第1, 第2, 第3各項の諸因数は通常それぞれ正であり, 気泡体積  $V_a$  が増加すると第2項のために一部は緩和されながらも各項の和は通常減少して, 第4, 第5項の増加を打ち消して行く。したがってサンプリングの過程が進むにつれて気泡体積  $V_a$  は通常増加することとなる。

間隙水圧を与える (5.1) 式について考察すると, 間隙水の圧縮率を無視した完全飽和<sup>7)</sup>の場合に較べ最後の1項が附加された形となっている(2.1式参照)。サンプリングの過程が進むと右辺第2, 第3項は減少し, 第4

表-1 数値計算に使用した標準常数值

初期間隙水圧	$u_0$ (t/m <sup>2</sup> )	$z, z=20$ m
鉛直有効応力	$\sigma_v'$ (t/m <sup>2</sup> )	$0.6z, z=20$ m
静止土圧係数	$K_0$	0.5
水平有効応力	$K_0\sigma_v'$ (t/m <sup>2</sup> )	$0.3z, z=20$ m
平均間隙圧係数	$\bar{A}$	0.1
表面張力	$q$ (t/m)	$7.4 \times 10^{-6}$
初期気泡半径	$r_0$ (m)	$7.4 \times 10^{-6}$
初期飽和度	$S_0$ (%)	99
初期間隙率	$n_0$	2/3
Henry の溶解係数	$H$	0.02
飽和蒸気圧	$u_a$ (t/m <sup>2</sup> )	-9.75
体積膨脹係数	$m_s$ (m <sup>3</sup> /t)	$1 \times 10^{-2}$
$V_a/V_{a0}$		1.98
$V_0/V_{a0}$		150

註 7) 「完全飽和」は原地盤ではもちろんサンプリングの後にも気泡が発生しないことを意味するために名付けたもので, 通常は間隙水の圧縮性が無視できることを指している。しかし粒子骨格の圧縮率が非常に小さい場合にはたとえ気泡が発生しなくてもその圧縮性を無視することができない。逆に骨格構造の圧縮率が大きい場合には多少の気泡があってもその圧縮性を無視することもある。

項は増加するので, 間隙水圧  $u$  は一般に減少するが, 気泡体積率の増加  $(V_a - V_{a0})/V_0$  に比例し, 土粒子骨格の圧縮率  $m_s$  に逆比例した値だけその減少が緩和されることになる。なお水圧減少の緩和量  $(V_a - V_{a0})/(m_s V_0)$  が減少量自体  $\{\Delta\sigma_3 + \bar{A}\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)\}$  の絶対値に等しいと仮定すれば (5.2) 式において第1項の減少が卓越して左辺は負となるので (いい換えれば気泡体積の増加量はそれ程多くはないので) 通常の場合に間隙水圧  $u$  が増加することは考えられない。次に (5.3) 式で得られる飽和度に

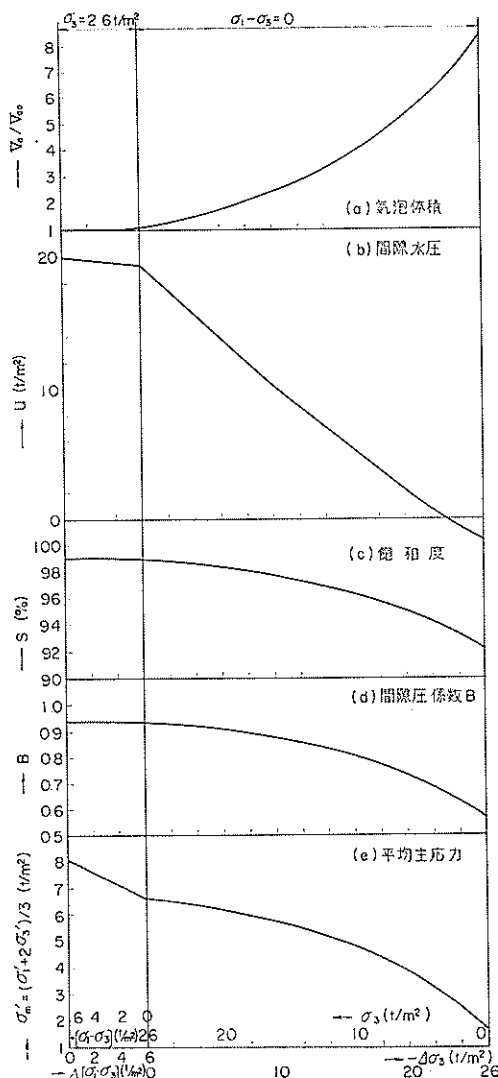


図-2 完全サンプリングに伴う気泡体積, 間隙水圧, 飽和度, 間隙圧係数  $B$  および平均主応力の変化

についてはサンプリングの過程で  $V_a$  が増加するため次第に減少して行く。

正規圧密粘土の完全サンプリングにおいて初めに軸差応力が解除され、つぎに側圧が解除されたものとした時の気泡体積、間隙水圧、飽和度、間隙圧係数  $B$  および平均有効応力  $\sigma_m'$  の一例を計算してみた。計算には表-1 の条件を仮定し、結果を図-2 にまとめた。上に考察した傾向がよく現れている。なお間隙圧係数  $B$  が飽和度と同じように減少して行き、平均有効応力  $\sigma_m'$  がサンプリングの過程とともに減少して行くのも一般に予想される傾向と一致する。

### 6. 完全試料の残留有効応力と飽和度

機械的な攪乱を受けないいわゆる完全サンプリングにより原位置で正規圧密状態にある試料がその軸差応力  $(1-K_0)\sigma_v'$  および側圧  $(K_0\sigma_v'+u_0)$  をすべて解除され、いわゆる完全試料となった場合について考えてみよう。この場合には (3.4) 式と (4.4) 式とを (2.6) 式に代入し、前章と同様の手法を用いてその解を求めることもできるが、前章で得られた解にこの場合の応力変化量を代入した方が簡単である。

正規圧密粘土の完全サンプリングによる両主応力の変化量はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) &= -(1-K_0)\sigma_v' \\ \Delta\sigma_3 &= -(K_0\sigma_v' + u_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots(6.1)$$

この条件を (5.1) 式に代入し、またこの場合の間隙水圧 (残留間隙水圧,  $u_p$ ) は残留有効応力と絶対値が等しく符号が反対であることを考慮すれば、完全試料の残留有効応力  $\sigma_p'$  が次式で与えられる。

$$\sigma_p' = -u_p = \sigma_v' \left\{ K_0 + (1-K_0)\bar{A}_p \right\} - (V_{ap} - V_{a0}) / (m_s V_0) \dots\dots(6.2)$$

完全飽和の場合の完全試料の残留有効応力は次式で与えられる (Ladd and Lambe, 1963)。

$$\sigma_{pp}' = \sigma_v' \left\{ K_0 + (1-K_0)\bar{A}_p \right\} \dots\dots(6.3)$$

これを (6.2) 式と比較すれば  $V_{ap}$  が  $V_{a0}$  より大きいことから不飽和の場合には残留有効応力の小さくなることわかる。また (6.2) 式をつぎのように書き替えることができる。

$$\sigma_p' = \sigma_{pp}' - (V_{ap} - V_{a0}) / m_s V_0 \dots\dots(6.2')$$

つぎに完全試料についての条件式を求めると (6.1) 式を (5.2) 式に代入して次式が得られる。

$$\frac{V_{a0} + V_a}{V_{ap} + V_a} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_d \right) - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_{ap}} \right)^{1/3} = 0 \dots\dots(6.4)$$

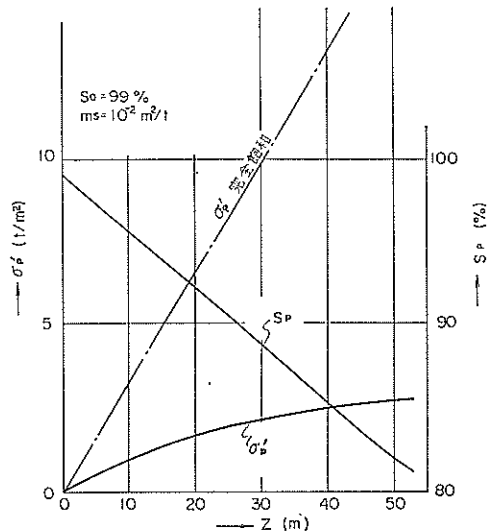
したがって (6.2), (6.4) 両式が不飽和を考慮した完全試料の残留有効応力を求める解である。

完全試料の飽和度は (5.3) 式と同様に次式で表わされ、

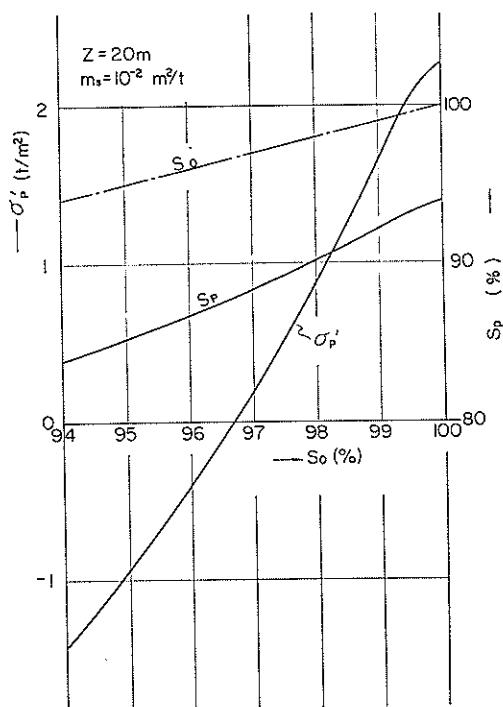
$$S_p = V_w / (V_{ap} + V_w) \dots\dots(6.5)$$

(6.4) および (6.5) 式がこの場合の解となる。

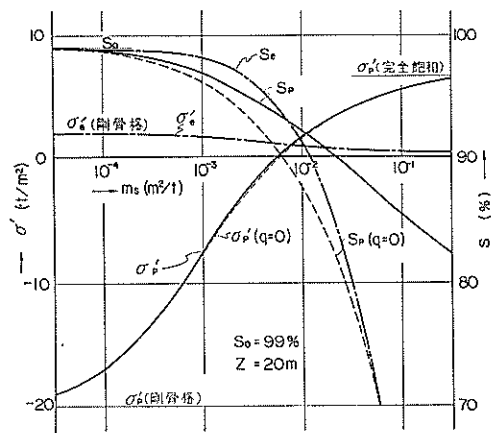
(6.2'), (6.4) 両式で与えられる不飽和完全試料の残留有効応力  $\sigma_p$  と (6.5) 式で与えられる飽和度  $S_p$  がどのような値になるかの概念をつかむために、2, 3 のケースについて数値計算を行なった。この時の諸常数については前章の例と同じ表-1 の値を選んだ。図-3(a) に深さとの関係を示す。鎖線で示された完全飽和試料の残留有効応力が深さとともに直線的に増加するのに対し、不飽和試料ではそれほど増加せず、深くなるにつれて両者は急激に離れて行く。一方飽和度は深さとともにほぼ直線的に減少し、40 m 附近から僅かに上に凹の曲線となっている。図-3(b) は初期飽和度  $S_0$  を変数とした場合である。残留有効応力、飽和度の両者とも僅かに S 字型のカーブを描きながら初期飽和度の減少とともに減少している。鎖線で示された初期飽和度と完全試料の飽和度との差は  $S_0$  が減少するにつれて大きくなり、不飽和をますます助長させている。初期飽和度が 100% の場合でも残留有効応力が完全飽和の値 6.6 (t/m<sup>2</sup>) にならないのは初めに溶け込んでいる空気量として水の体積の 2% ( $H=0.02$ ) を想定しているためであるが、この場合には初期気泡半



(a) 深さによる変化  
図-3 完全試料の残留有効応力と飽和度



(b) 初期飽和度による変化



(c) 粒子骨格の圧縮率による変化  
図-3 完全試料の残留有効応力と飽和度

径  $r_0$  の仮定に問題があり、8章でさらに詳しい検討を加える。初期飽和度が97%以下になると残留有効応力は0を通り越して負の値となる。このことは残留間隙水圧の値が負ではなく正であることを示し、実際の試料では間隙水が浸み出して来ることを意味する。この傾向は図-3(c)の実線で示された粒子骨格の圧縮率  $m_s$  との関係で一層明確となる。すなわち骨格構造の圧縮率が大きくて間

隙水の圧縮率が比較的小さい場合には残留有効応力が完全飽和の値に近づくが、剛骨格の場合には原位置での水圧がそのまま残って残留有効応力は  $-20(t/m^2)$  となる。また剛骨格の場合には飽和度も原位置での値から変化しない。なお(3.3')式において対数項を一次項で近似したための誤差は表-1の条件を用いた場合、 $V_{ap}$  で1%、 $\sigma_p'$  で4%小さく、 $S_p$  で0.08%大きかった。

図-3に示された残留有効応力と飽和度との値およびその範囲はある想定された条件での計算値であり、実際の試料についても起り得るかどうかについては充分の検討を必要とする。問題点の第1は図-3(c)で想定した  $m_s$  範囲であろう。Skempton(1961)によれば正規圧密粘土の圧縮率  $m_s$  は  $6 \times 10^{-3} m^2/t$  のオーダーで代表される。しかしサンプリングに伴う応力変化が概ね膨脹過程であることを考えればこれより1桁小さい値が妥当であり、 $7.5 \times 10^{-4} m^2/t$  のオーダーとされる過圧密粘土の圧縮率で代表されよう。したがって表-1で仮定した  $m_s$  は1桁大きい値であり、図-3(c)の横軸において中心より左寄りが現実的な範囲であると考えられる。

問題点の第2は図-3に現れた負の残留有効応力すなわち正の残留間隙水圧であろう。著者の経験によれば圧密試験終了後の膨脹過程で荷重を0に近づけるとその体積圧縮係数は次第に大きくなり圧密時のそれに近い値となる。まして有効応力が負となるような場合には土粒子骨格の圧縮率がさらに大きくなるものと考えられ、4章で骨格構造の圧縮率を一定と仮定したこと自体に問題が残る。いずれにしても有効応力の減少につれて圧縮率が增大する性質は残留有効応力が負となる傾向を緩和する方向に働き、現実にはそれほど小さな残留有効応力にならないものと思われる。

問題点の第3はサンプリングの過程とその後に起る間隙水の移動であろう。サンプラーを引き上げる際の水の移動は無視し得るとしても、試料保存期間中の移動は実際問題でも考慮する必要がある。上述のように残留間隙水圧が正となった場合には試料中の間隙水が浸み出し、やがて平衡を保った状態では残留有効応力が負となることは考えられない。これに対し残留間隙水圧が負の場合には大気中に水の供給源がないので移動は起らず、水分の乾燥を別にすれば、試料表面のメヌカスで一定の圧力差を保持することになる。しかし間隙中の空気分をも考慮した今度の場合には間隙水圧が負であっても必ずしも間隙流体の移動がないとは考えられず、しかも空気分が水分より容易に移動することを考え合わせると現象は

単純には推測できない。これについては改めて9章で考察する。

本章までの議論は Schuurman (1966) が気泡を含んだ間隙水の圧縮率について考察した最近の研究を応用し、さらに飽和蒸気圧の項をも考慮したもので現象的にはかなり忠実なものである。しかし現実には気泡の半径（または水圧と気泡圧との差）を知るのが難しいことなどに難点があり、実際問題に直接応用することはできにくい。そこで次章以下にその近似解を求め、厳密解との比較から近似解の誤差あるいはその傾向を知る手掛りとしよう。

### 7. 表面張力を無視した場合の解

気泡の半径が大きい場合には表面張力  $q$  の影響を無視することができる。この場合 (5.2) 式はつぎのようになり、

$$\frac{V_{a0} + V_a}{V_a + V_d} (u_0 - u_a) - \frac{V_a - V_{a0}}{m_s V_0} - \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \} = 0 \quad \dots (7.1)$$

その解はつぎのようになる。

$$2V_a = V_{a0} - V_d - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \} \pm \sqrt{[V_{a0} + V_a - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \}]^2 + 4m_s V_0 (V_{a0} + V_d) (u_0 - u_a)} \quad \dots (7.2)$$

飽和蒸気圧  $u_a$  が大気圧基準では通常負であることなどを考慮すると  $\sqrt{\quad}$  内第2項の各因数はそれぞれ正となり、 $\sqrt{\quad}$  内第1項の [ ] 内は正負の2ケースが考えられる。いま、後者が正である場合を考えると複号が示す範囲はつぎのようになり、

$$\text{正符号} \dots V_a > V_{a0} - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \} > -V_d$$

$$\text{負符号} \dots V_a < -V_d < 0$$

現実には  $V_a$  が負となる場合は考えられないことから負符号を探ることができないのは明らかである。したがって、

$$2V_a = V_{a0} - V_d - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \} + \sqrt{[V_{a0} + V_a - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_a \}]^2 + 4m_s V_0 (V_{a0} + V_d) (u_0 - u_a)} \quad \dots (7.2')$$

(7.2') 式を (5.1) 式に代入すれば表面張力を無視した場合の間隙水圧が次式で与えられる。

$$2u = u_0 + u_a + \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) - (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sqrt{\{ u_0 - u_a + \Delta \sigma_3 + \bar{A} \Delta (\sigma_1 - \sigma_3) - (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) \}^2 + 4(u_0 - u_a) (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0)} \quad \dots (7.3)$$

飽和度については (7.2') 式で求めた  $V_a$  を (5.3) 式

に用いて計算することができる。また間隙圧係数  $B$  については (5.5) 式の  $q$  を無視し (5.4) 式に代入した次式と (7.2') 式とを組み合わせて計算することができる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{(V_a + V_d)^2}{m_s V (V_{a0} + V_d) (u_0 - u_a)}} \quad \dots (7.4)$$

(7.4) 式で  $V_a$  による  $V$  の変化は小さいので  $B$  には  $(V_a + V_d)$  の形で気泡体積の影響が現れ、サンプリングの過程が進んで  $V_a$  が増加すると  $B$  は次第に減少することがわかる。

完全試料の残留有効応力と飽和度に関して表面張力の影響を無視するとその解はつぎのようになる。まず (7.2') 式に (6.1) 式を代入すると、

$$2V_{ap} = V_{a0} - V_d + m_s V_0 (\sigma_{pp}' + u_a) + \sqrt{\{ V_{a0} + V_d + m_s V_0 (\sigma_{pp}' + u_a) \}^2 + 4m_s V_0 (V_{a0} + V_d) (u_0 - u_a)} \quad \dots (7.5)$$

となり、(7.3) 式に (6.1) 式を代入するか、(6.2') 式に (7.5) 式を代入するとこの場合の残留有効応力または残留間隙水圧が次式で与えられる。

$$2\sigma_p' = -2u_p = (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' - u_a - \sqrt{\{ (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' + u_a \}^2 + 4(u_0 - u_a) (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0)} \quad \dots (7.6)$$

またこの場合の飽和度は (7.5) および (6.5) 式から次式で与えられる。

$$S_p = \frac{2V_w / (m_s V_0)}{2V_w / (m_s V_0) + (V_{a0} - V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' + u_a + \sqrt{\{ (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' + u_a \}^2 + 4(u_0 - u_a) (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0)}} \quad \dots (7.7)$$

(7.6) 式をつぎのように変換すると残留有効応力の範囲を知る上に便利である。

$$\sigma_p' = \frac{-2u_a \sigma_{pp}'}{(V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' - u_a} + \frac{-2u_a (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0)}{\sqrt{\{ (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' + u_a \}^2 + 4(u_0 - u_a) (V_{a0} + V_d) / (m_s V_0)}} \quad \dots (7.6')$$

(7.6') 式右辺の分母は各項すべて正であり、分子は第1項が正、第2項が負である。したがって残留有効応力の正負は分子各項の因数によって定まる。たとえば土粒子骨格の圧縮率  $m_s$  が大きい軟弱粘土の場合や初期飽和度（したがって  $V_{a0}$ ）の小さい場合には残留有効応力が正の値になることがわかる。

つぎに土粒子骨格の圧縮率  $m_s$  が非常に大きい場合

(7.6') 式は次式となり、

$$\sigma_{pp}'|_{m_s \rightarrow \infty} = \begin{cases} -u_a \cdots \cdots \sigma_{pp}' + u_a > 0 \\ \sigma_{pp}' \cdots \cdots \sigma_{pp}' + u_a < 0 \end{cases} \quad \cdots \cdots (7.8)$$

浅くて  $\sigma_{r'}$  したがって  $\sigma_{pp}'$  が小さいうちは完全飽和の場合と一致するが、どれ程深くなっても大気圧から蒸気圧(真空基準)を差し引いた値以上にはなり得ない。逆に骨格構造の圧縮率  $m_s$  が 0 に近づくときは次式となり、

$$\sigma_{pp}'|_{m_s=0} = -u_0 \quad \cdots \cdots (7.9)$$

初期水圧  $u_0$  がそのまま残ることになる (図-3(c) 参照)。

(7.7) 式において土粒子骨格の圧縮率  $m_s$  を  $\infty$  に近づけると飽和度は 0 となり、 $m_s$  を 0 に近づけると、

$$S_p|_{m_s=0} = V_w/(V_a + V_w) \quad \cdots \cdots (7.10)$$

となって初期飽和度と変わらないので  $m_s$  の大きいほど飽和度の小さくなることがわかる。また深さ  $z$  が大きくなって  $\sigma_{pp}'$  および  $u_0$  が大きくなると飽和度は小さくなる。

表面張力を無視した場合の  $\sigma_{pp}'$  と  $S_p$  との一例を図-3(c) に点線で示した。使用した条件は表面張力  $q$  を 0 としたほかは表-1 と同じである。図から判るように残留有効応力  $\sigma_{pp}'$  はほとんど変わらないが、飽和度  $S_p$  は  $m_s$  の大きい部分で大きな差が見られる。これは空気圧を水圧と同じ ( $q=0$ ) としているために残留有効応力の大きな部分(水圧が小さな部分)では計算上気泡が大きく拡がることになるためである。

### 8. 初期飽和の近似解

一般に海面下の原地盤では間隙水中に空気は十分溶け込んでいるが気泡は存在しないという状態が最も普通のケースであろうと思われる<sup>註8)</sup>。この場合はしかし(5.2) 式において  $r_0 = V_{a0} = 0$  となり、このままでは解が求まらない。そこで(3.5) 式に立ち戻って考察を改めよう。

原位置での初期状態で気泡が存在せず、しかも空気が十分に溶け込んでいる場合には(3.5) 式はつぎのように表わせる。

註 8) 土中で気泡が定常的に発生する有機質土のような場合には平衡状態においても気泡の存在が考えられる。しかし気泡の補給源がない一般の場合には一時的に気泡が存在しても気泡圧と間隙水圧との差から気泡が溶け込み、拡散して上方に移動し、両者の間に圧力差のない海面を通じて大気中に散逸する傾向があって長期間の後には気泡のない状態で平衡を保つものと考えられる。一方空気が十分に溶け込んでいない化学的に不飽和な状態では逆に溶解空気が上方から移動し、長期的には飽和状態を保つものと思われる。

$$(V_a + V_d)u_a = V_{at}u_0 \quad \cdots \cdots (8.1)$$

また(3.9') 式はこの場合にも当てはまる。しかし、(3.11) 式はこの場合無意味なので(3.10) 式をそのまま用いることとし、(3.9'), (3.10) および(8.1) 式から(3.14) 式に相当するものとして次式が得られる。

$$u = \frac{V_{at}u_0}{V_a + V_d} - 4q \left( \frac{\pi N}{6V_a} \right)^{1/3} + u_a \quad \cdots \cdots (8.2)$$

ここまでは真空基準で表わしてきた圧力をここで大気圧基準に戻すと(8.2) 式はつぎのように変わる。

$$u = \frac{V_d(u_0 + p_0)}{V_a + V_d} - 4q \left( \frac{\pi N}{6V_a} \right)^{1/3} + u_a \quad \cdots \cdots (8.2')$$

ここに  $p_0$  は真空基準で表わした大気圧で  $1.03 \text{ kg/cm}^2$  である。

(8.2') 式で表わされる気泡体積と水圧との関係は一例を図-4 に示すように、 $V_a$  が 0 に近づくと間隙水圧  $u$  は急激に減少し、 $V_a \rightarrow 0$  において  $-\infty$  となる。このことはサンプリングのように気泡体積が増加する場合には気泡の発生する瞬間に水圧は  $-\infty$  にまで下り、また UU 試験のように側圧が増加して  $V_a$  が減少する場合には気泡が完全に溶け込む瞬間に水圧が急激に低下することを意味し、実際の現象とは著しく矛盾する。Schuurman (1966) はこの間の現象をつぎのように説明している。すなわち、気泡が発生するとき(または気泡が完全に溶け込むとき)には  $N$  個の気泡が同時に半径 0 から徐々に大きくなるのではなく、ある半径の気泡が徐々に個数を増しながら発生してゆき、同時にその平均半径も増大する過渡領域が存在する。そして  $V_a$  と  $u$  との関係は図-4 の鎖線のようになり、過渡領域はかなりの範囲におよぶ。過渡領域がどこで終り、それまでの圧力関係がどうなるかについての詳細は明らかではないが、実用的にはつぎの仮定が一応許されるであろう。すなわち過渡領域は実線で表わされる曲線の頂点で終り、それまでは気泡体積

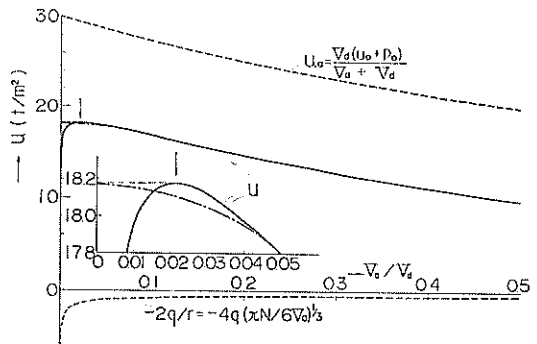


図-4 気泡体積と水圧との関係

にかかわらず一定の水圧となることにする。いい換えれば水圧が減少しようとする瞬間にある体積の気泡が発生し、その間の気泡圧は(8.1)式に従い、気泡の数は(8.2)式に従い、また気泡の半径は(3.10)式に従うとするものである。

(8.2') 式を  $V_a$  について微分し、これを 0 と置けば、限界気泡体積  $V_{ao}$  とこの時の気泡数  $N_0$  との関係が得られる。

$$\frac{V_a(u_0 + p_0)}{(V_{ao} + V_a)^2} - \frac{4q}{3V_{ao}} \left( \frac{\pi N_0}{6V_{ao}} \right)^{1/3} = 0 \quad \dots\dots(8.3)$$

仮定によりこの限界点での水圧がとりもなおさず原位置での初期水圧に等しいとするから(8.2') 式は次式となる。

$$\frac{V_a(u_0 + p_0)}{V_{ao} + V_a} - 4q \left( \frac{\pi N_0}{6V_{ao}} \right)^{1/3} + u_a - u_0 = 0 \quad \dots\dots(8.4)$$

(8.3) および(8.4) 式より限界気泡数  $N_0$  を求め、その後の気泡数が変わらない ( $N=N_0$ ) との仮定からこれを(8.2') 式に代入し、限界状態以降の間隙水圧  $u$  が次式で与えられる。

$$u = \frac{V_a(u_0 + p_0)}{V_a + V_a} - \frac{3V_a V_{ao}(u_0 + p_0)}{(V_{ao} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ao}}{V_a} \right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots(8.5)$$

ここに

$$V_{ao} = V_a \{ \sqrt{U(3+U)} - (1+U) \} \quad \dots\dots(8.6)$$

$$U = \frac{u_0 + p_0}{u_0 - u_a} \quad \dots\dots(8.7)$$

一方上で仮定した過渡領域においても(2.5) 式の関係が成り立つものとすれば、左辺は(3.3') 式と同様につきのようになり(以下サフィックス  $c$  で限界状態を表わす)。

$$\int_{u_0}^{u_c} n m_s du \equiv - \int_0^{V_{ac}} \frac{dV_a}{V} = - \ln \frac{V_c}{V_0} \equiv \frac{-V_{ac}}{V_0} \quad \dots\dots(8.8)$$

右辺においてもこれに対応する有効応力の減少が伴わなければならないことになる。いまこれを等方有効応力  $d\sigma_3' = d\sigma_1'$  に対応させることとし、軸差応力は変わらないものとするれば次式が得られる。

$$- \frac{V_{ac}}{V_0} = \int_{\sigma_3^0 - u_0}^{\sigma_3^c - u_0} m_s d\sigma_3' = m_s (\sigma_{3c} - \sigma_3^0) = m_s d\sigma_{3c} \\ \therefore d\sigma_{3c} = -V_{ac}/(m_s V_0) \quad \dots\dots(8.9)$$

これをいい換えれば、サンプリングの過程が進んで  $d\sigma_{3c}$  だけ全応力が減少しても水圧は変化せず、これがそのまま有効応力の減少となってこの間に  $V_{ao}$  だけ試料の体積は増加すると仮定したことになる。実際の現象としては

図-4 の鎖線で示されたようにこの間にも間隙水圧は減少し、有効応力の減少は仮定したほどではないであろうが、図の実線で表わされる(8.2') 式をそのまま用いるよりも誤差は少ないであろう。

限界状態以降について5章に用いた手法を適用すると、(3.3'), (8.9) および(4.3) 式の関係から初期飽和の場合の間隙水圧を与える次式が得られる。

$$u = u_0 + d\sigma_3 + \bar{A}d(\sigma_1 - \sigma_3) + (V_a - V_{ao})/(m_s V_0) + V_{ao}/(m_s V_0) \quad \dots\dots(8.10)$$

ここで(3.3') および(8.8) 式で行なった近似操作を元に戻し、再び近似を行なうと上式はつぎのようになる。

$$u = u_0 + d\sigma_3 + \bar{A}d(\sigma_1 - \sigma_3) + V_a/(m_s V_0) \quad \dots\dots(8.10')$$

すなわち(5.1) 式で  $V_{ao}=0$  とおいたものと変わらない。(8.10') 式と(8.5) 式とを組み合わせると初期飽和の場合の条件式として次式が得られる。

$$\frac{V_a(u_0 + p_0)}{V_a + V_a} - \frac{3V_a V_{ao}(u_0 + p_0)}{(V_{ao} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ao}}{V_a} \right)^{1/3} - \frac{V_a}{m_s V_0} - d\sigma_3 - \bar{A}d(\sigma_1 - \sigma_3) - u_0 + u_a = 0 \quad \dots\dots(8.11)$$

(8.5) 式を  $V_a$  について微分すると、

$$\frac{du}{dV_a} = - \frac{V_a(u_0 + p_0)}{(V_a + V_a)^2} + \frac{V_a V_{ao}(u_0 + p_0)}{V_a (V_{ao} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ao}}{V_a} \right)^{1/3} \quad \dots\dots(8.12)$$

となり、(5.4) 式と組み合わせるとこの場合の間隙圧係数  $B$  を求めることができる。ただし過渡領域においては水圧が変わらないとの仮定から  $B=0$  とすることになる。

つぎに原位置で飽和状態にあった土が完全試料となった場合について考察しよう。(8.10') 式と(6.1) 式とから完全試料の残留有効応力と間隙水圧とがつぎのようになる。

$$\sigma_p' = -u_p = \sigma_{pp}' - V_{ap}/(m_s V_0) \quad \dots\dots(8.13)$$

この場合の条件式は(6.1) 式を(8.11) 式に代入して次式となる。

$$\frac{V_a(u_0 + p_0)}{V_{ap} + V_a} - \frac{3V_a V_{ao}(u_0 + p_0)}{(V_{ao} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ao}}{V_{ap}} \right)^{1/3} - \frac{V_{ap}}{m_s V_0} + \sigma_{pp}' + u_a = 0 \quad \dots\dots(8.14)$$

表-1 の条件(ただし  $S_0=100\%$ ) を用いて初期飽和完全試料の残留有効応力と飽和度を計算すると  $\sigma_p' = 2.46$  ( $t/m^2$ )、 $S_p = 94.2$  (%) となり、図-3(b) に示された  $\sigma_p' = 2.27$  ( $t/m^2$ )、 $S_p = 93.9$  (%) に較べると残留有効応力で 8%、飽和度で 0.3% 大きくなっている。

(8.11) 式において表面張力の影響を表わす第 2 項を除き、7 章と同様の検討を加えると、初期飽和で表面張力を無視した場合の気泡体積が次式で与えられる。



$$2V_a = -V_d - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} d (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_d \} + \sqrt{[V_d - m_s V_0 \{ \Delta \sigma_3 + \bar{A} d (\sigma_1 - \sigma_3) + u_0 - u_d \}]^2 + 4V_d m_s V_0 (u_0 + p_0)} \quad \dots\dots (8.15)$$

(8.15) 式を (8.10') 式に代入してこの場合の空隙水圧はつぎようになる。

$$2u = u_0 + u_d + \Delta \sigma_3 + \bar{A} d (\sigma_1 - \sigma_3) - V_d / (m_s V_0) + \sqrt{[u_0 - u_d + \Delta \sigma_3 + \bar{A} d (\sigma_1 - \sigma_3) - V_d / (m_s V_0)]^2 + 4V_d (u_0 + p_0) / (m_s V_0)} \quad \dots\dots (8.16)$$

また空隙圧係数  $B$  については (8.12) 式で表面張力の影響を表わす右辺第2項を無視し、これを (5.4) 式に代入して次式となる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{(V_a + V_d)^2}{m_s V V_d (u_0 + p_0)}} \quad \dots\dots (8.17)$$

(6.1) 式を (8.16) 式に代入すると表面張力を無視した場合の初期飽和完全試料の残留有効応力が次式で与えられる。

$$2\sigma_p' = -2u_p = V_d / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' - u_d - \sqrt{[V_d / (m_s V_0) + \sigma_{pp}' + u_d]^2 + 4V_d (u_0 + p_0) / (m_s V_0)} \quad \dots\dots (8.18)$$

またこの時の気泡体積は (8.15) 式からつぎようになる。

$$2V_{ap} = -V_d + m_s V_0 (\sigma_{pp}' + u_d) + \sqrt{[V_d + m_s V_0 (\sigma_{pp}' + u_d)]^2 + 4V_d m_s V_0 (u_0 + p_0)} \quad \dots\dots (8.19)$$

表-1 の条件では (8.18) 式から  $\sigma_p' = 2.45$  (t/m<sup>2</sup>)、(8.19) 式から  $S_p = 94.1$  (%) となり表面張力の影響を考えた場合とほとんど変わらない。

### 9. 保存試料の残留有効応力と飽和度

前章までに述べた議論は試料の構成成分に移動がないとの仮定に立っているが、6章にも述べたように実際のサンプリングにおいてはその構成成分、ことに空気分の移動は容易に起こり得るものと思われ、これに伴う応力の変化についても考慮する必要がある。

採取した試料の気泡圧力が大気圧とは異なる場合空隙水への溶解度が異なるために空隙水を通じて空気分の移動が起こる。たとえば気泡圧が大気圧より大きい場合には気泡の周りで溶解空気濃度が高くなり、濃度の低い大気側へ拡散して大気中に析出することとなつてついに両圧力が等しいところで平衡する<sup>註9)</sup>。空気分が散逸(または集積)すると試料中の気泡圧、したがって空隙水

圧も変化し、有効応力の変化のために試料自体の体積も変化する。この場合土粒子の散逸はなく、またその圧縮性も無視できるので、体積変化はすなわち土粒子骨格の圧縮量(または膨張量)に等しい。

$$-dV = m_s V d\sigma_3' \quad \dots\dots (9.1)$$

ところで水分の散逸は空気分のそれほど容易ではないのでここでは水分の移動がないものと仮定する。註3)に述べたように水の圧縮率は無視できるので体積変化はすなわち気泡体積の変化に帰し、これが土粒子骨格の圧縮量と等しくなる。

$$-dV_a = m_s V d\sigma_3' \quad \dots\dots (9.1')$$

空気分の移動のない採取直後の状態から平衡までの過程を追えば

$$-\int_{\sigma_{ai}}^{\sigma_{ae}} \frac{dV_a}{V} = \int_{-u_i}^{-u_e} m_s d\sigma_3' \quad \dots\dots (9.2)$$

ここに

$V_{ai}$ : 採取直後の気泡体積 (cm<sup>3</sup>)

$V_{ae}$ : 平衡後の気泡体積 (cm<sup>3</sup>)

$u_i$ : 採取直後の空隙水圧でこの時の残留有効応力  $\sigma_i'$  の負数 (kg/cm<sup>2</sup>)

$u_e$ : 平衡後の空隙水圧でこの時の残留有効応力  $\sigma_e'$  の負数 (kg/cm<sup>2</sup>)

(9.2) 式の左辺は (3.3) 式と同じ形であり、右辺は (4.3) 式左辺の第1項と同じ形であつてその解はつぎようになる。

$$m_s (u_i - u_e) = -\ln \frac{V_e}{V_i} = -\frac{V_{ae} - V_{ai}}{V_i} \quad \dots\dots (9.3)$$

$$\therefore u_e = u_i + (V_{ae} - V_{ai}) / (m_s V_i) \quad \dots\dots (9.3')$$

ここに

$V_i$ : 採取直後の試料体積 (cm<sup>3</sup>)

$V_e$ : 平衡後の試料体積 (cm<sup>3</sup>)

一方平衡後の空隙水圧についても (3.9') 式は成り立つが、ここでは外気の相対湿度も100%になっており、気泡内の空気圧は大気圧から飽和蒸気圧を差し引いた値で平衡しているものとするれば、

$$u_e = p_0 - 2q/r_e \quad \dots\dots (9.4)$$

ここに  $r_e$  は平衡後の気泡半径 (cm) を表わす。(9.4) 式は真空基準で表わしたものであり、これを大気圧基準に

註9) 溶液に過飽和状態が存在するようにこの場合にも完全な平衡に達しないままで止まっていることは十分に考えられる。また空気分の散逸にはかなりの時間を要し、現実にはその途中段階にあることが多いであろう。しかしここでは最も極端なケース(あるいは理想的なケース)として完全に平衡した場合を考える。

引き戻すと結局次式となる。

$$u_e = -2q/r_e \quad \dots\dots(9.4')$$

気泡の数が変わらないとの仮定からこの場合にも(3.11)式が成り立つので(9.3')および(9.4')式を組み合わせるとつぎの条件式が得られる。

$$\frac{2q}{r_i} \left( \frac{V_{ai}}{V_{ae}} \right)^{1/3} + \frac{V_{ae} - V_{ai}}{m_s V_i} + u_i = 0 \quad \dots\dots(9.5)$$

または

$$\frac{2q}{r_i} \left( \frac{V_{ai}}{V_{ae}} \right)^{1/3} + \frac{V_{ae} - V_{ai}}{m_s V_i} - \sigma_i' = 0 \quad \dots\dots(9.5')$$

ここに  $r_i$  は試料採取直後の気泡半径 (cm) である。したがって 6 章の場合と同様にその残留有効応力  $\sigma_e'$  は(9.3')式からつぎのようになり、

$$\sigma_e' = -u_e = \sigma_i' - (V_{ae} - V_{ai})/(m_s V_i) \quad \dots\dots(9.6)$$

気泡体積が増加する場合には残留有効応力が減り、体積が減少する場合には残留有効応力の増加することがわかる。ここで(9.5')式の関係を(9.6)式に代入すると、

$$\sigma_e' = \frac{2q}{r_i} \left( \frac{V_{ai}}{V_{ae}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots(9.6')$$

となり、完全に平衡した保存試料の残留有効応力は表面張力に起因する気泡と水との圧力差であって、必ず正となることがわかる。さらに表面張力の影響を無視し得るものとすればその残留有効応力は必ず 0 となる。

6 章に述べた完全試料について上述の議論を適用してみよう。(6.2')および(3.11)式の関係を(9.5')式に代入し、(3.3')および(9.3)式で行なった近似の操作を元に戻すことによってこの場合の条件式として次式が得られる。

$$\frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_{ae}} \right)^{1/3} + \frac{V_{ae} - V_{a0}}{m_s V_0} - \sigma_{pp}' = 0 \quad \dots\dots(9.7)$$

また残留有効応力は(9.6)式に(6.2')式を代入し、上と同様の操作を経て次式となる。

$$\sigma_e' = -u_e = \sigma_{pp}' - (V_{ae} - V_{a0})/(m_s V_0) \quad \dots\dots(9.8)$$

$$= \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_{ae}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots(9.8')$$

(9.7)、(9.8)および(6.5)式の関係を用い、表-1の条件を使って完全試料の保存後の残留有効応力と飽和度を求めた1例を図-3(c)に鎖線で示す。上述したように採取直後には負の有効応力となった  $m_s$  の小さい範囲でも保存試料の残留有効応力はすべて正となり、しかも全域に亘って非常に小さいものとなる。6章の終りに現実により得る試料の残留有効応力について考察したが、上のことから実際のサンプリングにおいて試料がしばらく放置された場合には大きな残留有効応力あるいは負

の残留有効応力が測定されることはないと推察される。

つぎに原位置で飽和状態にあった土の完全試料について保存後の残留有効応力を求めてみよう。(8.13)式を(9.6)式に代入し、(9.8)式を求めた場合と同様にして次式を得る。

$$\sigma_e' = \sigma_{pp}' - V_{ae}/(m_s V_0) \quad \dots\dots(9.9)$$

また(9.5')式に(8.13)式を代入し、表面張力項  $2q/r_i$  に(8.14)式の第2項を代入してこの場合の条件式がつぎのようになる。

$$\frac{3V_a V_{ae}(u_0 + p_0)}{(V_{ae} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ae}}{V_{ae}} \right)^{1/3} + \frac{V_{ae}}{m_s V_0} - \sigma_{pp}' = 0 \quad \dots\dots(9.10)$$

したがって(9.9)式をつぎのように書き直すこともできる。

$$\sigma_e' = \frac{3V_a V_{ae}(u_0 + p_0)}{(V_{ae} + V_a)^2} \left( \frac{V_{ae}}{V_{ae}} \right)^{1/3} \quad \dots\dots(9.9')$$

## 10. UU 試験における残留有効応力

前章までに述べたように機械的な攪乱のないいわゆる完全試料であっても間隙中に含まれる気泡、あるいは間隙水中に溶け込んでいる空気分によってその残留有効応力は大幅に低減し、飽和度が低下する。残留有効応力の低下がこのような不飽和土の強度にどう影響するかは必ずしも明らかではないが、傾向的にはこれが強度の低下となって現われるものと考えられる。すなわち間隙中の気泡や溶解空気は見掛け上の攪乱を増大させ、一軸圧縮試験による  $q_u$  値を低下させるものと考えられる。

この意味から三軸試験機による非圧密非排水(UU)試験で間隙の飽和度を 100% にしてからセン断する方法は見掛けの攪乱をなくすことになり、完全不攪乱強度により近い値が得られることになる。以下UU試験における拘束圧と残留有効応力との関係について考察を進めよう。

UU試験に用いられる拘束圧は等方であり、(5.1)式はつぎのように変わる。

$$u = u_u + \sigma - (V_{au} - V_a)/(m_s V_u) \quad \dots\dots(10.1)$$

ここに

$u_u$  : UU試験供試体の初期間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma$  : UU試験における拘束圧 (kg/cm<sup>2</sup>)

$V_{au}$  : 初期気泡体積 (cm<sup>3</sup>)

$V_u$  : 供試体の初期体積 (cm<sup>3</sup>)

同様に(5.2)式に相当する条件式はつぎのようになる。

$$\frac{V_{au} + V_a}{V_a + V_a} \left( u_u + \frac{2q}{r_u} - u_u \right) - \frac{2q}{r_u} \left( \frac{V_{au}}{V_a} \right)^{1/3} + \frac{V_{au} - V_a}{m_s V_u} - \sigma - u_u + u_u = 0 \quad \dots\dots(10.2)$$

ここに  $r_u$  は気泡の初期半径 (cm) である。

この時の残留有効応力  $\sigma'$  は拘束圧  $\sigma$  から (10.1) 式で表わされる水圧  $u$  を差引いたものであり、

$$\sigma' = \sigma - u = (V_{au} - V_a) / (m_s V_u) - u_u \quad \dots\dots (10.1')$$

初期残留有効応力 ( $-u_u$ ) より気泡体積率の減少に比例し、土粒子骨格の圧縮率に逆比例した量だけ大きくなるのがわかる。

なおこの時の飽和度は (10.2) 式と (5.3) 式から求めることができ、間隙圧係数  $B$  は (5.4), (10.2) および (5.5) 式の関係から求めることができる。

一般にUU試験の拘束圧は大きめにとり、完全に飽和 ( $B=1$ ) したことを確かめてから試験するのが普通である。この場合には (10.2) 式の  $V_a$  は0となり、表面張力による圧力差を表わす第2項が $\infty$ となってこの式は成り立たない。これは8章で考察した初期飽和の逆の過程であり、8章と同様の手法で近似解を求める必要がある。

8章で限界状態を定めた (8.2') 式に相当するものは、この場合 (3.14) 式の関係であり、つぎのように表わされる。

$$u = \frac{V_{au} + V_a}{V_a + V_a} \left( u_u + \frac{2q}{r_u} - u_d \right) - \frac{2q}{r_u} \left( \frac{V_{au}}{V_a} \right)^{1/3} + u_d \quad \dots\dots (10.3)$$

(10.3) 式を  $V_a$  で微分して0と置くことにより、限界気泡体積  $V_{a0}'$  を与える次式が得られる。

$$\frac{V_{au} + V_a}{(V_{a0}' + V_a)^2} \left( u_u + \frac{2q}{r_u} - u_d \right) - \frac{2q}{3r_u V_{a0}'} \left( \frac{V_{au}}{V_{a0}'} \right)^{1/3} = 0 \quad \dots\dots (10.4)$$

8章では水圧が既知の原位置において飽和しているケースであったが、ここで取り扱うのは飽和時の水圧が未知の逆過程であり、限界気泡体積を与える式も異なるものとなった。

限界状態における間隙水圧  $u_0$  は (10.3) および (10.4) 式を組み合わせて求めることができ、この時の拘束圧  $\sigma_0$  は (10.1) 式からつぎのようになる。

$$\sigma_0 = u_0 - u_u + (V_{au} - V_{a0}') / (m_s V_u) \quad \dots\dots (10.5)$$

8章で仮定したのと同様に限界間隙水圧  $u_0$  はさらに拘束圧が増しても気泡が完全になくなるまでは変わらず、この間の拘束圧の増分  $\Delta\sigma_0$  はそのまま有効応力の増分になるものとしよう。拘束圧の増分  $\Delta\sigma_0$  は (8.9) 式を求めたと同様の手続きによりつぎのようになる。

$$\Delta\sigma_0 = V_{a0}' / (m_s V_0') \quad \dots\dots (10.6)$$

ここに  $V_0'$  は限界状態での供試体体積 ( $\text{cm}^3$ ) である。

気泡が完全に溶け込む時 (最終状態と名付け、サフィ

ックス  $f$  で表わす) の拘束圧は (10.5), (10.6) および (10.3) 式の関係から次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \sigma_0 + \Delta\sigma_0 \\ &= \frac{V_{au} + V_a}{V_{a0}' + V_a} \left( u_u + \frac{2q}{r_u} - u_d \right) - \frac{2q}{r_u} \left( \frac{V_{au}}{V_{a0}'} \right)^{1/3} \\ &\quad + \frac{V_{au}}{m_s V_u} - u_u + u_d \quad \dots\dots (10.7) \end{aligned}$$

またこの時の残留有効応力すなわち最終残留有効応力は、間隙水圧が過渡領域で変わらないとの仮定からつぎのようになり、

$$\sigma_f' = \sigma_f - u_0 = V_{au} / (m_s V_u) - u_u \quad \dots\dots (10.8)$$

(10.1') 式において  $V_a=0$  とおいたものと変わらない。

6章で求めた完全試料について上述の議論を適用してみよう。(6.2') 式を (10.1) 式に代入すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} u &= \sigma - \sigma_{pp}' + (V_{ap} - V_{a0}) / (m_s V_0) \\ &\quad - (V_{ap} - V_a) / (m_s V_p) \quad \dots\dots (10.9) \end{aligned}$$

土粒子骨格の圧縮率  $m_s$  は膨張時、圧縮時ともに等しいとすれば、上式右辺の第2, 第3項は近似操作の復元で統一され次式となる。

$$\sigma' = \sigma - u = \sigma_{pp}' - (V_a - V_{a0}) / (m_s V_0) \quad \dots\dots (10.9')$$

上式で気泡体積  $V_a$  を原位置での体積  $V_{a0}$  に一致させると残留有効応力は完全飽和の場合と同じになる。気体の圧縮、溶解の可逆性を考えれば、この時の水圧は原位置でのそれと等しい。したがって、完全試料の残留有効応力を完全飽和の場合と同じにするためにはその間隙水圧を原位置でのそれと等しくするか、またはその拘束圧を完全飽和完全試料の残留有効応力 ( $\sigma_{pp}'$ ) と原位置での水圧との和に等しくすればよいことになる。

なお完全試料についての条件式は (10.2) 式に相当するものが次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{V_{a0} + V_a}{V_a + V_a} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_d \right) - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} \\ - \frac{V_a - V_{a0}}{m_s V_0} - \sigma + \sigma_{pp}' + u_d = 0 \quad \dots\dots (10.10) \end{aligned}$$

同様に完全試料の飽和度は (10.10) および (5.3) 式から、間隙圧係数  $B$  は (5.4), (5.5) および (10.10) 式から求めることができる。

完全試料の限界気泡体積を与える式は (10.4) 式からつぎのようになる。

$$\frac{V_{a0} + V_a}{(V_{a0}' + V_a)^2} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_d \right) - \frac{2q}{3r_0 V_{a0}'} \left( \frac{V_{a0}}{V_{a0}'} \right)^{1/3} = 0 \quad \dots\dots (10.11)$$

この時の限界間隙水圧は (10.3) 式から次式で与えられる。

$$u_c = \frac{V_{a0} + V_a}{V_{a0}' + V_a} \left( u_0 + \frac{2q}{r_0} - u_a \right) - \frac{2q}{r_0} \left( \frac{V_{a0}}{V_{a0}'} \right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots(10.12)$$

(10.11) および (10.12) の2式は必ずしも完全試料でなくとも構成々分に異動のあるもの (保存試料) を除いたすべての攪乱試料について成り立つ。

完全試料の限界拘束圧  $\sigma_c$ 、最終拘束圧  $\sigma_f$  および最終残留有効応力  $\sigma_f'$  はそれぞれつぎようになる。

$$\sigma_c = u_0 + \sigma_{pp}' - (V_{a0}' - V_{a0}) / (m_s V_0) \quad \dots\dots(10.13)$$

$$\sigma_f' = \sigma_f - u_c = \sigma_{pp}' + V_{a0} / (m_s V_0) \quad \dots\dots(10.14)$$

(10.14) 式から一般に完全試料のUU試験における最終残留有効応力は完全飽和完全試料の残留有効応力より原位置での気泡体積率  $V_{a0}/V_0$  に比例し、体積圧縮係数  $m_s$  に逆比例した値だけ大きくなることわかる。

(10.9)~(10.14) 式等を用い完全試料のUU試験における残留有効応力、飽和度および間隙圧係数  $B$  の変化を表-1 の条件で計算すると図-5 のようになり、一般に知られている傾向と一致する。

次に8章で求めた初期飽和完全試料について考えてみよう。(8.13)式で与えられるこの場合の残留間隙水圧を

(10.1) 式に代入して次式が導かれ、

$$\sigma' = \sigma - u = \sigma_{pp}' - V_a / (m_s V_0) \quad \dots\dots(10.15)$$

(10.9') 式で  $V_{a0}=0$  とおいたものと変わらない。(10.2) 式に (8.5), (8.13) 式等の関係を入れるとこの場合の条件式が次のようになる。

$$\frac{V_a(u_0 + p_0)}{V_a + V_a} - \frac{3V_a V_{a0}(u_0 + p_0)}{(V_{a0} + V_a)^2} \left( \frac{V_{a0}}{V_a} \right)^{1/3} - \frac{V_a}{m_s V_0} - \sigma + \sigma_{pp}' + u_a = 0 \quad \dots\dots(10.16)$$

限界状態の仮定が8章の場合と同じであることから限界気泡体積  $V_{a0}'$  が8章で求めた  $V_{a0}$  と等しく、限界間隙水圧  $u_c$  が原位置での水圧  $u_0$  と等しいことは当然であるが、本章の初めに考察した一般の場合と同様の手続きを経てもこのことが確かめられる。なおこの場合の限界拘束圧  $\sigma_c$  および最終残留有効応力  $\sigma_f'$  はそれぞれつぎのようになり、

$$\sigma_c = u_0 + \sigma_{pp}' - V_{a0} / (m_s V_0) \quad \dots\dots(10.17)$$

$$\sigma_f' = \sigma_f - u_0 = \sigma_{pp}' \quad \dots\dots(10.18)$$

初期飽和完全試料の最終残留有効応力は完全飽和完全試料の残留有効応力と一致する。

つぎに9章で求めた保存完全試料について考察しよう。まず(9.8)式を(10.1)式に代入して拘束圧  $\sigma$  と間隙水圧  $u$  との関係が完全試料の場合とまったく同じ

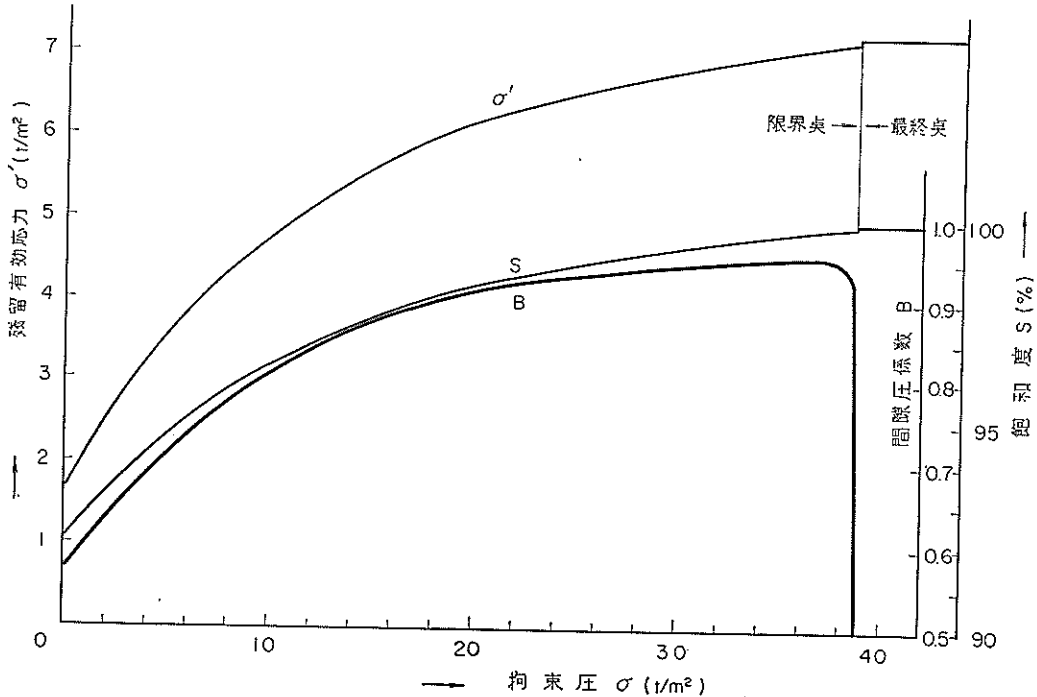


図-5 UU試験における完全試料の残留有効応力と飽和度

(10.9') 式で表わされることがわかる。ただしこの場合の条件式は完全試料の場合とは異なり次式となる。

$$\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{V_a+V_a} + \frac{2q}{r_0} \left(\frac{V_{a0}}{V_a}\right)^{1/3} + \frac{V_a-V_{a0}}{m_s V_0} + \sigma - \sigma_{pp}' - u_a = 0 \quad \dots\dots(10.19)$$

ここに初期気泡体積  $V_{ae}$  は (9.7) 式から決定される。保存完全試料の限界間隙水圧  $u_c$  は (3.11), (9.4'), (10.3) および (10.4) 式からつぎのようになる。

$$u_c = -\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{V_{ae}'+V_a} - \frac{2q}{r_0} \left(\frac{V_{a0}}{V_{ae}'}\right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots(10.20)$$

$$\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{(V_{ae}'+V_a)^2} + \frac{2q}{3r_0 V_{ae}'} \left(\frac{V_{a0}}{V_{ae}'}\right)^{1/3} = 0 \quad \dots\dots(10.21)$$

また限界拘束圧  $\sigma_c$ , 最終拘束圧  $\sigma_f$  および最終残留有効応力  $\sigma_f'$  はそれぞれ完全試料の場合と変らず, (10.13) および (10.14) 式を適用できる。このうち前者は限界間隙水圧が異なるために同じ数値とはならないが, 最終残留有効応力  $\sigma_f'$  はその値まで完全試料の場合と等しくなる。すなわち採取直後の完全試料と保存後のそれとでは各々の残留有効応力は大きく異なるが, これをUU試験に供した場合, 最終的にはいずれも同一の残留有効応力となることがわかる。

つぎに初期飽和完全試料を保存後UU試験に供した場合を考えよう。(9.9) 式を (10.1) 式に代入すると (10.15) 式で表わされる初期飽和完全試料の場合と同じ結果が得られ, 一般の完全試料と保存完全試料との関係に準ずることがわかる。ただしこの場合にも条件式は異なり, つぎのようになる。

$$\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{V_a+V_a} + \frac{3V_a V_{a0}(u_0+p_0)}{(V_{a0}+V_a)^2} \left(\frac{V_{a0}}{V_a}\right)^{1/3} + \frac{V_a}{m_s V_0} + \sigma - \sigma_{pp}' - u_a = 0 \quad \dots\dots(10.22)$$

ここに初期気泡体積  $V_{ae}$  は (9.10) 式から決定される。初期飽和保存完全試料の限界間隙水圧  $u_c$  はつぎの2式で与えられる。

$$u_c = -\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{V_{ae}'+V_a} - \frac{3V_a V_{a0}(u_0+p_0)}{(V_{a0}+V_a)^2} \left(\frac{V_{a0}}{V_{ae}'}\right)^{1/3} + u_a \quad \dots\dots(10.23)$$

$$\frac{u_a(V_{ae}+V_a)}{(V_{ae}'+V_a)^2} + \frac{V_a V_{a0}(u_0+p_0)}{V_{ae}'(V_{a0}+V_a)^2} \left(\frac{V_{a0}}{V_{ae}'}\right)^{1/3} = 0 \quad \dots\dots(10.24)$$

また限界拘束圧  $\sigma_c$ , 最終拘束圧  $\sigma_f$  および最終残留有効応力  $\sigma_f'$  はこれも保存完全試料の場合と同じく初期飽和完全試料の (10.17) および (10.18) 式が適用される。

最後に表面張力の影響を無視した場合について考察し

よう。一般に不飽和土をUU試験に供した場合の気泡体積と間隙水圧はそれぞれ (7.2') および (7.3) 式よりつぎのようになる。

$$2V_a = V_{au} - V_a - m_s V_u (\sigma + u_u - u_a) + \sqrt{\{V_{au} + V_a - m_s V_u (\sigma + u_u - u_a)\}^2} + 4m_s V_u (V_{au} + V_a)(u_u - u_a) \quad \dots\dots(10.25)$$

$$2u = u_u + u_a + \sigma - (V_{au} + V_a)/(m_s V_u) + \sqrt{\{u_u - u_a + \sigma - (V_{au} + V_a)/(m_s V_u)\}^2} + 4(u_u - u_a)(V_{au} + V_a)/(m_s V_u) \quad \dots\dots(10.26)$$

したがってその残留有効応力は次式となる。

$$2\sigma' = 2\sigma - 2u = \sigma - u_u - u_a + (V_{au} + V_a)/(m_s V_u) - \sqrt{\{\sigma + u_u - u_a - (V_{au} + V_a)/(m_s V_u)\}^2} + 4(u_u - u_a)(V_{au} + V_a)/(m_s V_u) \quad \dots\dots(10.26')$$

また飽和度は (10.25) 式を (5.3) 式に代入してつぎのようになる。

$$\frac{2}{S} = 1 - \frac{1}{S_u} - H - \frac{m_s}{n_u S_u} (\sigma + u_u - u_a) + \sqrt{\left\{1 - \frac{1}{S_u} - H + \frac{m_s}{n_u S_u} (\sigma + u_u - u_a)\right\}^2} - \frac{4m_s}{n_u S_u} \left(1 - \frac{1}{S_u} - H\right) (u_u - u_a) \quad \dots\dots(10.27)$$

ここに  $n_u, S_u$  はそれぞれ初期間隙率および初期飽和度である。なお間隙圧係数  $B$  は (7.4) 式と (10.25) 式から求めることができる。

表面張力の影響を無視した場合の最終残留有効応力は (10.1') 式で  $V_a=0$  としてつぎのようになり,

$$\sigma_f' = \sigma_f - u_f = V_{au}/(m_s V_u) - u_u \quad \dots\dots(10.28)$$

またこの時の拘束圧は (10.2) 式で  $q=0, V_a=0$  としてつぎのようになる。

$$\sigma_f = \frac{V_{au}}{V_a} (u_u - u_a) + \frac{V_{au}}{m_s V_u} \quad \dots\dots(10.29)$$

(10.28) および (10.29) 式から最終状態までの水圧の増分を求めると次式となり,

$$\Delta u = u_f - u_u = \frac{V_{au}}{V_a} (u_u - u_a) = \frac{1 - S_u}{HS_u} (u_u - u_a) \quad \dots\dots(10.30)$$

飽和蒸気圧を無視 ( $u_a = -p_0$ ) すれば Bishop (1957) の式と一致する。

## 11. 実測との比較

昭和43年度, 岡山県錦海湾におけるサンプリング実験

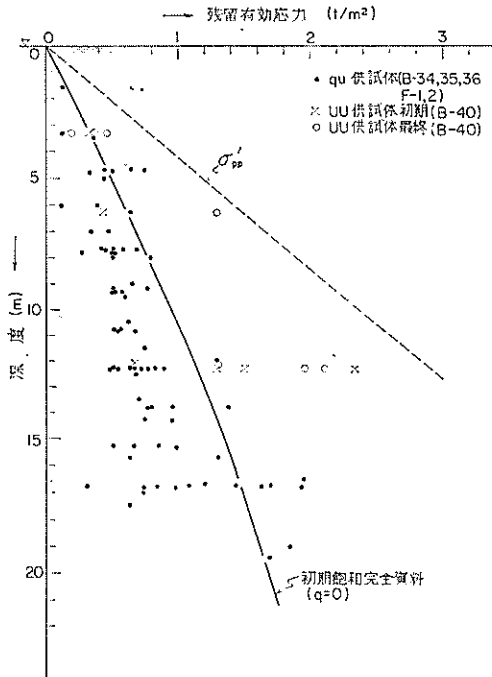


図-6 採取した錦海粘土の残留有効応力

に併行して残留間隙水圧の測定を行なった(松本, 堀江, 奥村, 1969)。測定は代表的な数孔について行ない、サンプリング方法の相異による残留有効応力の差を明らかにすることが目的であったが、1章にも述べたように間隙中の空気分のため全般にかなり小さな値となり、またボーリング孔毎の差も明瞭ではなく、目的を達するには至らなかった。測定結果を一括して図-6 に示す。かなりのばらつきはあるが、全般的には深さとともにほぼ直線的に増加している。

一方、持ち帰った一部の試料についてUU試験を行なった。成形した時の残留有効応力と、側圧を上げた時の最終残留有効応力とをそれぞれ図-6 に併示する。保存期間が長かったので乾燥の影響も考えられ、 $q_u$  供試体より幾分大きな初期残留有効応力となっており、最終残留有効応力はこれよりさらに大きい。

同じ試料について三軸圧縮試験機による  $K_0$  圧密を行ない ( $K_0=0.466 \pm 0.003$ )、完全サンプリングを行なった結果、(6.3) 式における  $\sigma_{pp}'$  と  $\sigma_v'$  との比は 0.592 であった。この係数を用い、錦海粘土の平均単位体積重量  $0.4 \text{ t/m}^3$  を使って計算した完全飽和完全試料の残留有効応力  $\sigma_{pp}'$  を図-6 に点線で示す。一部のUU供試体の最終残留有効応力がこれに匹敵するほかは全般に実測

値の方がかなり小さい。

8章で述べたように原位置においては気泡はないけれども空気は十分に溶け込んでいると考えるのが妥当な仮定であり、またこの場合表面張力の影響を無視しても大きな誤差はないと考えられる。そこで初期飽和完全試料で表面張力の影響を無視した場合の残留有効応力を(8.18)式によって計算した。この時の初期間隙比には実測値の平均 3.3 を用い、体積膨脹係数  $m_s$  はつぎの考え方で算出した。

中瀬, 小林, 勝野 (1969) によれば、膨脹指数  $C_e$  と圧縮指数  $C_c$  との比  $\lambda$  は最大圧密荷重にかかわらず過圧密比 (OCR) のみによって一義的に定まる。圧縮指数  $C_c$  は正規圧密部で一定とみなせるので、正規圧密粘土のある荷重まで膨脹させた時の膨脹指数を求めるには圧密試験で最大圧密荷重から出発した膨脹指数の同じ過圧密比の値を読み取ればよい。このことを体積膨脹係数  $m_s$  に換算すると、同じ過圧密比での  $m_s$  そのままではなく、圧密試験における最大圧密荷重と原位置でのそれとの比を読み取った  $m_s$  に掛け合わせれば近似的には求める値となる。

残留有効応力を測定した範囲内での平均土被り圧は  $0.4 \text{ kg/cm}^2$  であり、圧密試験を行なった時の最大荷重は  $9.0 \text{ kg/cm}^2$  であった。実測による残留有効応力の平均値は  $0.07 \text{ kg/cm}^2$  であり、土被り圧との相乗平均  $0.17 \text{ kg/cm}^2$  における  $m_s$  がこの場合の平均的な体積膨脹係数であると考えられる。求める  $m_s$  を上述の手続きによって算出すると  $1.4 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{t}$  となり、これを用いて(8.18)式の計算を行なうと図-6 に実線で示された曲線となって実測による  $q_u$  供試体の残留有効応力の上限とほぼ一致する。

上に用いた  $m_s$  の値は必ずしも妥当であるとはいえず、また試料採取後 1 時間以内に測定したとはいうものの若干の空気分の移動は考えられるので、計算値がそのまま機械的な攪乱のない状態を表わしているとは思われない。しかしながら計算値と実測値との関係が  $\sigma_{pp}'$  線とUU供試体の最終残留有効応力との関係に類似していることをも考え合わせると、機械的な攪乱の効果は  $\sigma_{pp}'$  線と実測値との差ではなく、実線で表わされた曲線と実測値との差に表われたと考えるのが妥当であり、傾向的には前章までに述べた理論が正しいことを物語る。少なくとも空気分の影響を無視しては実測値の解析を行なうことはできないといえよう。

## 12. む す び

正規圧密された不飽和粘土のサンプリングに伴う等温的応力変化をいくつかの仮定を設けて理論的に追跡し、つぎの諸点が明らかにされた。

(i) サンプリングの過程が進み応力が減少すると間隙中の気泡は次第にその体積を増し、飽和度が低下する。これに伴って間隙圧係数 $B$ も次第に小さくなる。間隙水圧もまた同様に減少するが、完全に飽和している場合に較べると気泡体積率の増加に比例し、体積圧縮係数に逆比例した量だけその減少が緩和される。

(ii) 機械的な攪乱を受けない完全試料の残留有効応力は、気泡体積率の増加に比例し、体積圧縮係数に逆比例した量だけ完全飽和の場合よりも小さい。またその飽和度も原位置における値より小さくなる。

体積圧縮係数が比較的大きい時の残留有効応力は完全飽和の場合に近づくと、この場合でも飽和蒸気圧(大気圧基準)の絶対値以上にはなり得ない。逆に土粒子骨格の圧縮率が非常に小さい時には原位置での間隙水圧がそのまま残り、残留有効応力が負になろうとする傾向がある。

採取深度が大きくなり、土被り圧と間隙水圧が大きくなると完全試料の飽和度は小さくなって行く。

(iii) 採取試料の保存中に空気が移動することを考慮に入れるとその残留有効応力は極く小さな値となり、しかも常に正となる傾向を持つ。空気の移動が完全に平衡した試料の残留有効応力は表面張力と気泡半径のみに支配され、表面張力の影響を無視し得るものとなれば0となる。

(iv) 試料を非圧密非排水試験に供した場合、その残留有効応力は拘束圧が増加し、気泡体積が減少するとともに大きくなる。

採取直後の完全試料をUU試験に供し、その間隙水圧が原位置での値になるまで側圧を上げるとその残留有効応力は完全飽和の場合と一致する。

完全試料を用い側圧を十分に上げた時の最終残留有効応力は、保存中に空気が移動したものであっても採取直後のものと変わらない。

完全試料の最終残留有効応力は原位置での気泡体積率に比例し、体積圧縮係数に逆比例した量だけ完全飽和の場合よりも大きくなる。

(v) 理論的に導かれた結果から実測値を傾向的に説明することができる。

## 13. あとがき

サンプリングに伴う応力と歪の変化は非常に複雑であり、これを逐一追跡することは不可能に見える。しかしながらサンプリングの技術を向上させ、より乱れの少ない試料を得るためにはどうしてもこれらの変化を究明し「攪乱」を定量的に把握する必要がある。ここでは関連する一つの試みとして間隙中の空気分を考慮した応力変化を簡単なケースについて追跡したが、これまで概念的には予想された傾向にある程度理論的な裏付けを与えることができた。しかしここに取り上げた範囲に限ってもなお多くの問題点が残っている。たとえばサンプリングには殆んど必ず温度変化を伴うがこれを放置したこと、あるいは間隙中の気泡に関してその半径がみな同じでその数が変わらないと仮定したこと、等々である。また空気分のために低下し、あるいは増大した残留有効応力が試料の強度にどう影響するかはさらに重要な項目であるが、これらの点についても今後の課題として逐次考察を進めたいと思っている。

終りに、11章で述べた実測はすべて土質試験課、梅田裕史技官によるものであることを附記し、感謝の意を表す。また原稿の段階で貴重な御意見を戴いた柳瀬重靖地盤改良研究室長、中瀬明男性研究室長および小林正樹技官に心から謝意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- 1) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R. (1969): Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, Proc. ASCE, Vol. 95 No. SM-1 pp. 33~51
- 2) Bishop, A.W. (1957): Some Factors Controlling the Pore Pressures set up during the Construction of Earth Dams, Proc. 4th ICSMFE, Vol. 2 pp. 294~300
- 3) 藤下利男 (1965): 荷重除去に伴う粘土の膨脹について、港湾技術研究所報告, 4巻1号 pp. 47~60
- 4) Ladd, C.C. and Lambe, T.W. (1963): The Strength of "Undisturbed" Clay Determined from Undrained Tests, ASTM, STP 361, pp. 342~371
- 5) 松本一明, 堀江宏保, 奥村樹郎 (1969): 沖積粘土のボーリングおよびサンプリングに関する研究 (第4報), 港湾技術研究所報告, 8巻2号 pp. 1~18
- 6) 中瀬明男, 小林正樹, 勝野克 (1969): 膨脹による粘土の強度変化について, 港湾技術研究所報告, 発表予定
- 7) Noorany, I. and Seed, H.B. (1965): In-situ Strength Characteristics of Soft Clays, Proc. ASCE, Vol. 91 No. SM-2 pp. 49~80

- 8) 奥村樹郎 (1969): 粘土試料の攪乱に関する研究 (第1報)—繰り返し三軸圧縮試験による攪乱実験—港湾技術研究所報告, 8巻1号 pp. 59~84
- 9) Schuurman, I.E. (1966): The Compressibility of an Air/water Mixture and a Theoretical Relation between the Air and Water Pressures, Geotech. Vol. 16 No. 4 pp. 269~281
- 10) Seed, H.B., Noorany, I. and Smith, I.M. (1964): Effects of Sampling and Disturbance on the Strength of Soft Clays, Research Report TE-64-1, Univ. of California, Berkeley.
- 11) Skempton, A.W. (1954): The Pore-Pressure Coefficient A and B, Geotech. Vol. 4 No. 4 pp. 143~147
- 12) Skempton, A.W. (1960): Correspondence to Geotech. Vol. 10 No. 4 pp. 186~187
- 13) Skempton, A.W. (1961): Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks, Pore Pressure and Suction in Soils (Butterworth) pp. 4~16
- 14) Skempton, A.W. and Sowa, V.A. (1963): The Behaviour of Saturated Clays during Sampling and Testing, Geotech. Vol. 13 No. 4 pp. 269~290
- 15) Sparks, A.D.W. (1963): Theoretical Considerations of Stress Equations for Partially Saturated Soils, 3rd Reg. Conf. Africa SMFE, Vol. 1 pp. 215~218

記 号 表

A : Skempton の間隙圧係数  
 $\bar{A}$  : サンプリングに伴う平均間隙圧係数  
 $\bar{A}_p$  : 完全サンプリングにおける平均間隙圧係数  
 $B=1/(1+nm_v/m_s)$  : Skempton の間隙圧係数  
H : Henry の溶解係数, 20°C で約 0.02  
 $K_0$  : 静止土圧係数  
 $m_s$  : 土粒子骨格の圧縮率 (cm<sup>2</sup>/kg)  
 $m_v$  : 間隙水の圧縮率 (cm<sup>2</sup>/kg)  
N : 気泡の数  
n : 試料の間隙率  
 $p_0$  : 真空基準で表わした大気圧, 1.03 (kg/cm<sup>2</sup>)  
q : 表面張力, 約  $7.4 \times 10^{-5}$  (kg/cm)  
r : 気泡の半径 (cm)  
 $r_i$  : 試料採取直後の気泡半径 (cm)  
 $r_0$  : 原位置での気泡の初期半径 (cm)  
 $r_u$  : UU試験における気泡の初期半径 (cm)  
S : 試料の飽和度  
 $S_0$  : 原位置での初期飽和度  
 $S_p$  : 完全試料の飽和度  
 $S_u$  : UU試験供試体の初期飽和度  
UU : 非圧密非排水三軸圧縮試験  
u : 間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_a$  : 間隙空気圧 (kg/cm<sup>2</sup>)

$u_{a0}$  : 原位置での初期気泡圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_0$  : UU試験における限界間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_d$  : 20°C, 1 kg/cm<sup>2</sup>,  $r=\infty$  での飽和蒸気圧, 大気圧基準で約 -1.01 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_d'$  : 一般の飽和蒸気圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_e$  : 保存試料の間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_i$  : 試料採取直後の間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_0$  : 原位置における初期間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_p$  : 完全試料の残留間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_u$  : UU試験における初期間隙水圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $u_v$  : 間隙流体圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $V=V_a+V_w+V_s$  : 試料の全体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_a$  : 気泡の体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{a0}$  : 初期飽和試料のサンプリングに伴う限界気泡体積, (8.6) 式参照 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{a0}'$  : UU試験における限界気泡体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{ae}$  : 保存試料の気泡体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{ai}$  : 試料採取直後の気泡体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{a0}$  : 原位置における気泡の初期体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{ap}$  : 完全試料の気泡体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_{au}$  : UU試験における気泡の初期体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_e'$  : UU試験における限界状態での供試体々積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_a$  : 飽和溶解空気をその時の気泡圧力に換算した容積,  $V_a=HV_w$  (cm<sup>3</sup>)  
 $V_e$  : 保存試料の全体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_i$  : 試料採取直後の全体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_0$  : 原位置における試料の初期体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_p$  : 完全試料の全体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_s$  : 土粒子の体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_u$  : UU試験供試体の初期体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_v$  : 間隙の体積 (cm<sup>3</sup>)  
 $V_w$  : 間隙水の体積 (cm<sup>3</sup>)  
z : 深さ (cm)  
 $\sigma$  : UU試験における拘束圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma'$  : UU試験における残留有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_1$  : 最大全主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_1^0$  : 原位置における最大全主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_3$  : 最小全主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_3^0$  : 原位置における最小全主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_3'$  : 最小有効主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_c$  : UU試験における限界拘束圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_e'$  : 保存試料の残留有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_f$  : UU試験における最終拘束圧 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_f'$  : UU試験における最終残留有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_m'$  : 平均有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_p'$  : 完全試料の残留有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{pp}' = \sigma_f' (K_0 + (1-K_0)\bar{A}_p)$  : 完全飽和完全試料の残留有効応力 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_{v'}$  : 原位置での鉛直有効主応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

(1969.7.7 受付)