

# 等価応力に基づく正規圧密飽和粘土の 体積変化に関する考察

## STUDY ON VOLUME CHANGE CHARACTERISTICS OF SATURATED REMOULDED CLAYS BASED ON EQUIVALENT STRESS

稲田 倍徳\*・赤石 勝\*\*・張 惠文\*\*\*

By Masuho INADA, Masaru AKAISHI and Hueti-Wen CHANG

### 1. ま え が き

土の応力-ひずみ関係が時間に依存することはすでによく知られている。Terzaghi は土の体積ひずみを支配する応力として有効応力の概念を導入し圧密現象を説明した。Terzaghi の樹立した有効応力の概念は画期的なものであり、その後の土質力学を体系づけるのに役立ったばかりでなく、一次元圧密の工学的取り扱いに大きい役割を果たした。

一方、土のような粒状体のせん断時に体積が増大または減少するダイレイタンス現象については Reynolds 以来注目されてきた。Skempton や Henkel らは圧密、せん断時の挙動を説明するため、有効応力とダイレイタンスを結びつけ、間隙圧係数を用いて圧密せん断中の飽和粘土に発生する過剰間隙水圧を求めた<sup>1),2)</sup>。

地盤内の土要素に圧密現象、またはせん断現象がそれぞれ独立して生じることはきわめて異例の場合に限られる。土の圧密とせん断が同時に進行する場合の複雑な変形挙動を明らかにするためには、現在作用している応力から破壊時の応力までの変形過程とその時間依存性を連続的に知る必要がある。このためには現在までの応力-ひずみの履歴を明確にすると同時に、有効応力とダイレイタンスを結びつけた応力-ひずみ-時間関係を考察することが重要である。

筆者の一人がすでに発表した正規圧密飽和粘土のせん断変形と圧密による強度増加に関する研究では、土要素の応力を圧密によって体積を減少させる等方応力（等価応力）と、体積一定のまま形状のみ変形させる異方応力（主応力差）に分割する試みがなされている<sup>3)</sup>。

この場合の等価応力は、Skempton と Bishop が提

案した土のある含水比に対応する等価圧力と同義である<sup>4)</sup>。

今回の研究で筆者らは、Terzaghi による有効応力の概念と Skempton, Henkel らによるダイレイタンスを考慮した等価応力の概念を用いて応力-ひずみ関係の時間依存性を考察した。すなわち、まず均質等方正規圧密飽和粘土の土要素に発生する過剰間隙水圧と、圧密中の土要素に残留する過剰間隙水圧の関係から等価有効応力の概念を明確にした。ついで非排水せん断時のダイレイタンス係数、および排水せん断時のダイレイタンス係数を実験的に比較した後、ダイレイタンスに基づく土要素の等価有効応力体積-ひずみ関係とその時間依存性を考察した。

### 2. 等価応力の概念

地盤内の土要素に存在または発生する間隙水圧は等方応力である。これに対して土要素を構成する土粒子骨格に働く有効応力は多くの場合異方応力である。地盤内の土要素の応力-ひずみ関係を明らかにするため、われわれは土要素に働く異方応力をあらかじめこれと等価な等方応力に置き換えることによってダイレイタンスが応力-ひずみ関係におよぼす影響を考察することにした。

#### (1) 発生過剰間隙水圧と等価応力

いま、非排水状態におかれた任意の土要素に生じる軸対称主応力、および過剰間隙水圧の増分をそれぞれ図-1 に示す  $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$  および  $\Delta u_e$  とする。

軸対称主応力の増加によって非排水状態の正規圧密粘土に発生する過剰間隙水圧については、すでに、Henkel らによって研究されており、次の一般式が示されている<sup>2)</sup>。

$$\Delta u_e = B(\Delta\sigma_m + D \cdot \Delta\sigma_d) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

\* 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工修 東海大学講師 工学部土木工学科

\*\*\* 学生会員 工修 東海大学大学院博士課程 土木工学専攻



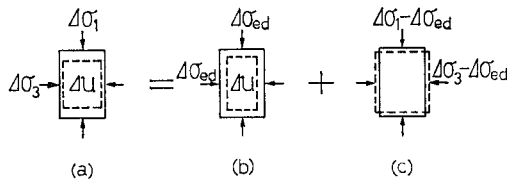


図-4 圧密とせん断

する<sup>5)</sup>。

図-3 によれば主応力差が  $\Delta\sigma_d$  に達したとき、平均有効主応力  $\sigma_m'$  および等方有効応力  $\sigma_{ed}'$  はそれぞれ次の値に達している。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_m' &= \sigma_m - \Delta u = \sigma_{m0}' + \Delta\sigma_m' \\ \sigma_{ed}' &= \sigma_{ed} - \Delta u = \sigma_{m0}' + \Delta\sigma_{ed}' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

土要素の圧密体積減少に寄与する等方有効応力  $\sigma_{ed}'$  をここでは等価有効応力とよぶ。

以上述べた等価有効応力の概念によれば、図-4 に示したように異方応力を受けた正規圧密飽和粘土に生じる変形 (a) を、圧密による体積変化 (b) およびせん断による形状変化 (c) に基づく変形に分離して考察できる。

なお、载荷中の土要素に残留する過剰間隙水圧  $\Delta u$  は、過剰間隙水圧  $\Delta u_{ed}$  の発生速度と排水に伴う減少速度に支配される。したがって、透水係数が大きいか、排水距離が小さくて減少速度が大きい土要素の主応力をきわめて遅い速度で増加させたときは、過剰間隙水圧が発生と同時に減少し、土要素内の残留過剰間隙水圧がほぼ零として測定されることもある。

以上から土要素内の過剰間隙水圧が零であるからといって、圧密現象が生じていない、または圧密による体積変化が終了したと解すべきではなく、圧密による体積変化の有無は、等価有効応力  $\sigma_{ed}'$  の変化によって判断すべきであると考えられる。

### 3. ダイレイタンシー係数

正規圧密飽和粘土の等価応力には主応力の大きさだけでなく、その増加速度または载荷時間などの時間に依存する土のダイレイタンシー係数が関与する。

ここでは、非排水状態および排水状態で主応力の変化を受けた土要素のダイレイタンシー係数  $D$  および  $D_d$  とその時間依存性を比較した。

#### (1) ダイレイタンシー係数 $D$ <sup>5)</sup>

##### a) 試料および実験方法

実験に用いた試料は、埼玉県越谷市草加バイパス入口の沖積地盤より採取した練返し飽和粘土の 74  $\mu$  ふるい通過分である。物理的性質は、粘土分 59%、シルト分 41%、 $G_s=2.67$ 、 $w_L=74\%$ 、 $w_p=33\%$ 、 $I_p$

=41% である。液性限界以上の含水比で十分練返してスラリー状にした粘土を、気泡が混入しないよう注意しながら直径 15 cm のモールドに入れ、自立する程度に圧密した後大型三軸室内に移し、0.5 あるいは 1.5 kg/cm<sup>2</sup> の等方圧力で予圧密した。

予圧密終了後、直径 5 cm、高さ 10 cm の円柱形供試体を成形し圧密促進のため供試体外周にフィルターペーパーを巻いて三軸室内に水中セットし、供試体に所定の周圧 1.0 あるいは 2.0 kg/cm<sup>2</sup> を加えて約 24 時間等方圧密した。

##### ① 非排水クリープ試験

供試体を非排水状態にしたまま、供試体上面からバックプレッシャーを加え、周圧を一定に保った状態で主応力差がそれぞれ  $\Delta\sigma_d=0.2, 0.4, \dots$  kg/cm<sup>2</sup> となる一定荷重を 24 時間载荷し、供試体下面で発生する過剰間隙水圧を測定した。

##### ② 非排水圧縮試験

周圧を一定に保ち主応力差増分  $\Delta\sigma_d=0.2$  kg/cm<sup>2</sup> が得られる荷重を時間間隔  $\Delta t=10, 90, 1440$  min ごとに段階的に载荷し、破壊に至るまでの供試体に発生する過

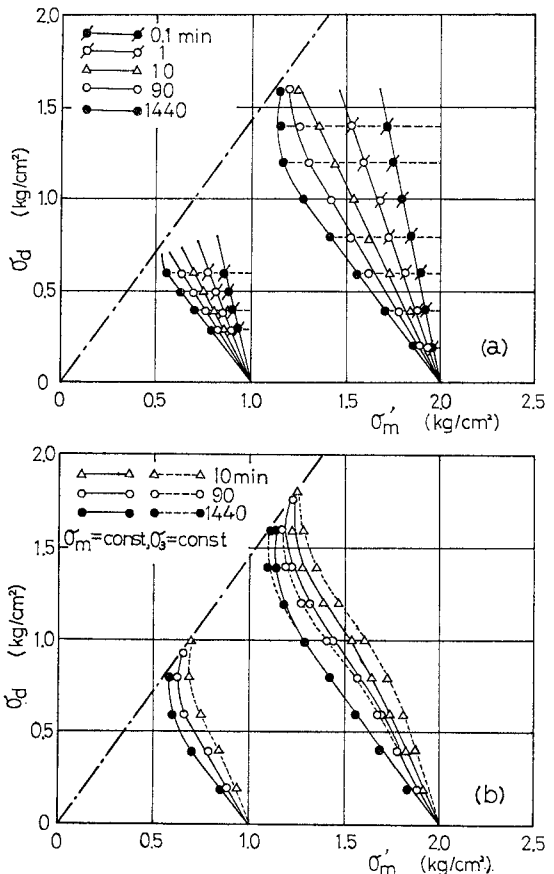


図-5 クリープ試験 (a) および圧縮試験 (b)

剰間隙水圧を測定した。

**b) 結果および考察**

クリープ試験の応力経路を用い経過時間  $t=0.1, 1, 10, 90$  および  $1440$  min ほどの  $\sigma_m'$  を結んだのが 図-5(a) である。図-5(b) は圧縮試験において各載荷段階ごとの放置終了時(載荷時間間隔  $\Delta t=10, 90, 1440$  min) における  $\sigma_m'$  を結んだものである。

図-5 の両図中に一点鎖線で示した破壊線は、別に行った定ひずみ型非排水三軸圧縮試験から得られたものである。

図-5(a) によるとクリープ試験の場合の経過時間ごとの  $\sigma_m'$  と  $\sigma_d$  の間には経過時間によらず直線関係が認められる。これに対して 図-5(b) から明らかなように圧縮試験の場合の各載荷段階ごとの  $\sigma_m'$  と  $\sigma_d$  の関係では、 $\Delta t=1440$  min の場合のみ直線で示され、より時間間隔の短い場合には直線関係は認められない。しかも載荷時間間隔と主応力差が小さい場合ほど、主応力差の増加に対する過剰間隙水圧の発生率が小さくなっている。

また、図-5(b) によると圧縮試験で最も大きい過剰間隙水圧発生率を示すのは、主応力差がほぼ土の降伏応力に達したときであるが、過剰間隙水圧の測定精度やせん断に伴う土の乱れなどの及ぼす影響が明らかでないので詳細については明らかにできない。

図-6 は、クリープ試験と圧縮試験において、同じ主応力差増分  $\Delta\sigma_d$  によって発生する過剰間隙水圧増分  $\Delta u_d = D \cdot \Delta\sigma_d$  を時間に対してプロットとして比較したものである。図によると圧縮試験の場合は、より以前のせん断応力履歴の影響を受けて載荷後約 300 min を経過するまでの過剰間隙水圧発生率はきわめて小さいが、それ以降はクリープ試験の場合にほぼ匹敵する過剰間隙水圧発生率を示している。したがって、載荷時間間隔が小さい(載荷速度が大きい)ほどダイレイタンスを十分に発揮し得る余裕がないものと考えられる。

以上のクリープ試験と圧縮試験におけるダイレイタンス係数  $D$  を式(5)から求め、経過時間  $t$  または載荷時間間隔  $\Delta t$  との関係を示したのが 図-7 である。ただし、圧縮試験の場合、 $\Delta t$  が短いときは主応力差の

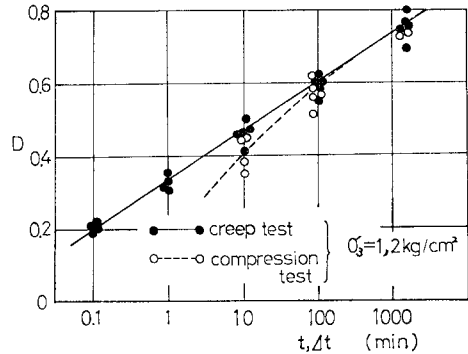


図-7  $D-t, D-\Delta t$  関係

増加とともに過剰間隙水圧の発生率が変わるので、これについてはほぼ上限降伏応力に達するまでの  $D$  の平均値をとった。

図-7 から次の点が指摘できる。

- ① クリープ試験、圧縮試験のいずれにおいても  $D-t$  または  $D-\Delta t$  の関係は載荷前の圧密圧力  $\sigma_{m0}'$  の大きさに影響されない。
- ② クリープ試験における  $D-\log t$  関係は直線で示される。
- ③ 圧縮試験において載荷速度が遅い(この場合は  $\Delta t \approx 300$  min 以上)ときは、せん断中にダイレイタンスが十分に発揮され  $D-\Delta t$  関係はクリープ試験における  $D-t$  関係に一致する。

しかし載荷速度が速いときの  $D-\Delta t$  関係はクリープ試験の  $D-t$  関係と一致しない。ずれの程度は、載荷速度が速いほど大きい。ただし、上限降伏応力付近の主応力差における  $D$  (最大値) は、クリープ載荷から得られる値に近い。

なお、以上の結果は等方応力で正規圧密された練返し粘土について認められた知見である。現場から採取された乱さない粘土試料、練返し後、 $K_0$  圧密のような異方応力により圧密された粘土あるいは過圧密粘土などの場合は③に示した傾向がさらに助長されよう。

**(2) ダイレイタンス係数  $D_d^{7)}$**

**a) 試料および実験方法**

実験に用いた試料は、前節の実験に用いた試料と同じ場所から採取した海成飽和粘土の  $74 \mu$  ふるい通過分であるが、採取深さが異なり物理的性質は、粘土分 46%, シルト分 54%,  $G_s=2.67, w_L=83\%, w_p=21\%, I_p=62\%$  であった。

骨格構造の異方性を少なくして均質等方な供試体をつくるため、3.(1)と同じ手法によって供試体を作成して三軸室内に水中セットし、予圧密と同じ周圧(0.5, 1, 2  $\text{kg/cm}^2$ )によって等方圧密した。

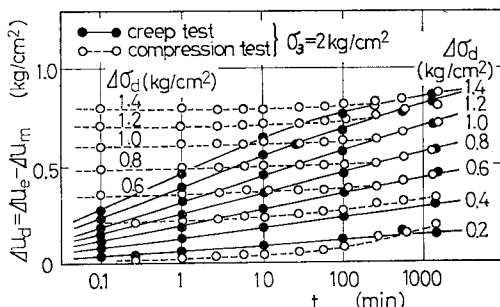


図-6  $\Delta u_d-t$  関係

① 平均主応力一定圧密試験

毎回新鮮試料を用いて周圧 0.5, 1 および 2 kg/cm<sup>2</sup> を加えて 24 時間の等方圧密 (K=1) を行った. また等方圧密の周圧に等しい  $\sigma_{m0}$  を圧密中一定に保つ異方圧密 (K=0.9~0.4) を行った. 異方圧密の場合は, まず等方圧で 24 時間圧密した後,  $\sigma_3$  を減じると同時に  $\sigma_1$  を増して,  $\sigma_m$  を一定に保ち主応力差増分を加え 24 時間異方圧密した.

異方圧密の主応力比 K は, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, および 0.4 の 6 種とし, 等方圧密から異方圧密に移る間にできるだけ高い過剰間隙水圧を生じないようにした. また異方圧密中に生じる供試体の変形と体積変化を知るため, 垂直変位と供試体上面からの排水量を測定した.

② 非排水クリープ試験

圧密圧力 2 kg/cm<sup>2</sup> で 24 時間等方圧密した供試体を非排水状態にし,  $\sigma_m$  を一定にしながら  $\sigma_d$  を所定の大きさにし, 以後  $\sigma_d$  を一定に保って発生する過剰間隙水圧  $\Delta u_d$  の値を 48 時間測定した. この試験の  $\sigma_d$  は, 0.4, 1.4, および 1.8 kg/cm<sup>2</sup> の 3 種とした.

b) 結果および考察

図-8 は, 平均主応力一定試験 から得られた  $\sigma_m'$  と間隙比  $e$  の関係を主応力比  $K=\sigma_3'/\sigma_1'$  をパラメーターにしてまとめたものである. 図-8 によれば,  $\sigma_m'$  が同じとき K が小さいほど圧密後の間隙比が減少している.  $\sigma_m'=1\text{kg/cm}^2$  のときの主応力比 K と間隙比  $e_K$  の関係を図中に表示しておいたが, これによると  $e_K$  は K に比例 (または  $\sigma_d$  に逆比例) して低下することが明らかである.

また, K の値によらず,  $e-\log \sigma_m'$  関係は互いに平行な直線で示されることが図中に表示した圧縮指数  $C_c$  の値からうかがわれる.

排水状態で載荷された土要素に生じる応力経路は, 図-3 に示したとおりであるが, これから  $\sigma_m$  一定の場合

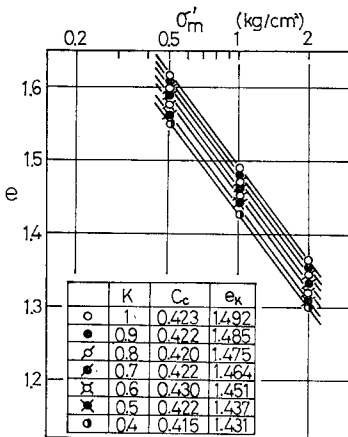


図-8  $e-\log \sigma_m'$  関係

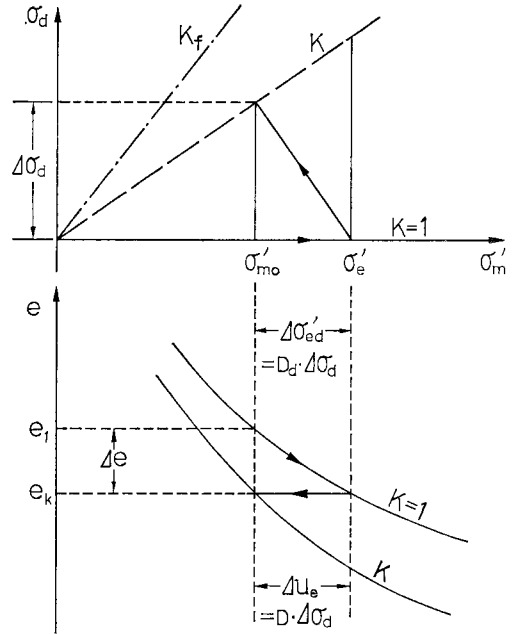


図-9 応力経路と体積変化

に生じる応力経路と圧密排水による土要素の体積変化の関係を示したのが図-9である. まず  $\sigma_{m0}'$  で等方圧密 (K=1) を終了した土要素の間隙比が  $e_1$  で示される. 次に  $\sigma_m$  一定のまま ( $=\sigma_{m0}'$ )  $\Delta \sigma_d$  を加え異方圧密 (K < 1) を終了した土要素の間隙比が  $e_K$  である. 異方応力の増加による等価有効応力の増分は式 (8) で示されるが,  $\sigma_m$  一定の異方圧密では,  $\Delta \sigma_m' = 0$  であるので,  $\Delta \sigma_{ed}' = D_d \cdot \Delta \sigma_d$  で示される. この  $\Delta \sigma_{ed}'$  によって異方圧密前後の等価有効応力は,  $\sigma_{m0}'$  から  $\sigma_e'$  に移ることになる.

等価有効応力の増加に伴う圧密によって土要素に生じる体積ひずみ増分  $\Delta \epsilon_v$  は, 次式で示される.

$$\Delta \epsilon_v = m_v^* \cdot \Delta \sigma_e' = m_v^* (\Delta \sigma_m' + D \cdot \Delta \sigma_d) \dots (11)$$

ここに,  $m_v^*$ : 等価有効応力に対して定義した体積圧縮係数

図-8 から体積変化  $\epsilon_v$  と  $\sigma_m'$  の関係を求め, 式 (11)

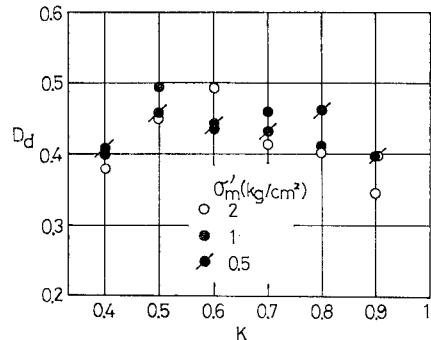
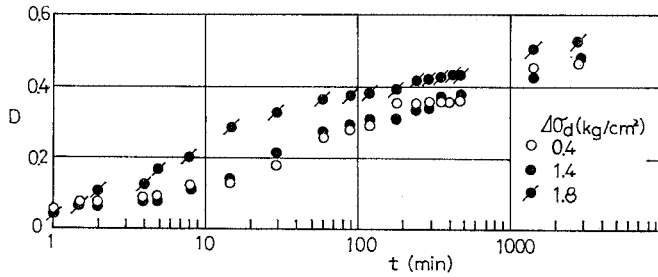


図-10  $D_d-K$  関係

図-11  $D-t$  関係

で  $\Delta\sigma_m' = 0$  とおき、圧密経過時間 1440 min における  $D = D_d$  を求めて  $K$  との関係を示したのが 図-10 である。図-10 によると、 $K = 0.4 \sim 0.9$  の範囲で多少のばらつきは見られるが、 $\sigma_m'$  および  $K$  に無関係に  $D_d$  は  $0.4 \sim 0.5$  に入り、平均 0.45 程度である。一方、同じ試料について行った  $\sigma_m$  一定非排水クリープ試験の結果に式 (5) の  $\Delta\sigma_m = 0$  として  $D$  と時間  $t$  の関係を求めたのが 図-11 である。測定値にかなりのばらつきは認められるが、 $\Delta\sigma_d$  によらずほぼ一つの直線上に測定値は集まっている。この関係から経過時間 1440 min における  $D$  は  $0.4 \sim 0.5$  の範囲で平均値はほぼ 0.45 であることがわかる。

図-10 と 図-11 に示した  $D_d$  と  $D$  がよく一致していることから、正規圧密粘土のダイレイタンシーについて次の点が指摘できる。

図-9 において、 $\sigma_{m0}'$  で等方圧密した後  $\sigma_m$  一定、排水状態で  $\Delta\sigma_d$  を加えある時間経過したとき発揮されたダイレイタンシー係数が  $D_d$  であれば、ダイレイタンシーに伴う  $\Delta\sigma_{ed}'$  によって土要素の間隙比は  $de$  低下する。

また  $\sigma_e'$  で圧密した後、 $\sigma_m$  一定のまま非排水状態で  $\Delta\sigma_d$  を増し、排水状態のときと同じ時間経過したとき発揮されているダイレイタンシー係数が  $D$  であるとき、過剰間隙水圧の増分は  $\Delta u_e$  で、間隙比は変化しない。 $D = D_d$  の成立は、 $\Delta u_e = \Delta\sigma_{ed}$  を意味するから、図-9 に矢印で示した応力経路と間隙比の経路を考えることが可能である。

したがって、正規圧密飽和粘土の非排水条件と排水条件下のダイレイタンシー係数それぞれ  $D$  と  $D_d$  は、作用応力の大きさには無関係で載荷後の経過時間または載荷速度のみに依存する定数である。また  $D = D_d$  とおくことができるので、式 (5) および式 (7) で求められる等価応力は排水条件によらず等値となる。

#### 4. ダイレイタンシーに基づく体積ひずみと時間依存性

外力の変化によって地盤内の土要素に作用する主応力

差は、一定値を保つことなく、土要素の圧密に伴って増加するのが普通である。このような状態のもとで生じるダイレイタンシーに基づく土要素の体積ひずみを明らかにする目的で、次の実験を行いその時間依存性について考察を加えた。

#### (1) ダイレイタンシーに基づく体積ひずみ<sup>8)</sup>

##### a) 試料および実験方法

実験に用いた試料と供試体の作成方法は、3. (1) a) と同じである。また圧密中の体積変化は、3. (2) a) と同じ方法で測定した。

##### ① 等方圧密試験

数段階に等方応力を増しそれぞれ 24 時間の圧密試験を行った。

##### ② 平均主応力一定圧縮試験

供試体を排水状態に保ち  $\sigma_m$  一定のまま  $\Delta\sigma_d$  を  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  ごと  $1 \text{ kg/cm}^2$  まで 5 段階に分け 載荷した。各段階の載荷時間間隔は 表-1 に示す 2 種である。

表-1 載荷時間間隔

step	1, 2	3, 4, 5	Total loading time
Period of loading step	300'	300'	1500'
	300'	1440'	4920'

載荷時間 300 min は 図-7 で述べたとおり、非排水クリープ試験から求めた  $D-t$  関係と非排水圧縮試験における  $D-\Delta t$  関係が一致する最小時間であり同時に各段階ごとの一次圧密終了時間とほぼ一致している。

##### b) 結果および考察

載荷時間間隔 300 min および 1440 min に対応するダイレイタンシー係数  $D$  は、図-7 からそれぞれ 0.66 および 0.75 である。この値を用いて各載荷段階ごとの等価有効応力増分  $\Delta\sigma_e'$  を求めて応力経路で示したのが 図-12 (a) である。図中の  $K_f$  線および  $K_0$  線は別に行ったせん断試験と圧密試験から求めた破壊線および  $K_0 (= \sigma_3'/\sigma_1')$  線を示したものである。

図-12 (a) のように求められた各段階ごとの  $\Delta\sigma_e'$  に対して測定された  $\Delta\varepsilon_v$  をプロットしたのが 図-12 (b) である。等方圧密試験から得られた  $\Delta\sigma_e' - \Delta\varepsilon_v$  関係を 図-12 (b) に実線で示して比較したが、これと  $\sigma_m$  一定圧縮試験の結果とは体積変化の測定に困難さにもかかわらず、かなりよい一致を示している。飽和土の間隙比と体積ひずみには、一義的な関係があるから、この結果は 図-8 の  $e - \log \sigma_m'$  関係に対して加えた 図-9 の考察の妥当性を示したものと見える。

図-12 (c) の点線は、①  $\Delta\sigma_d = 1 \text{ kg/cm}^2$  が瞬間に加え

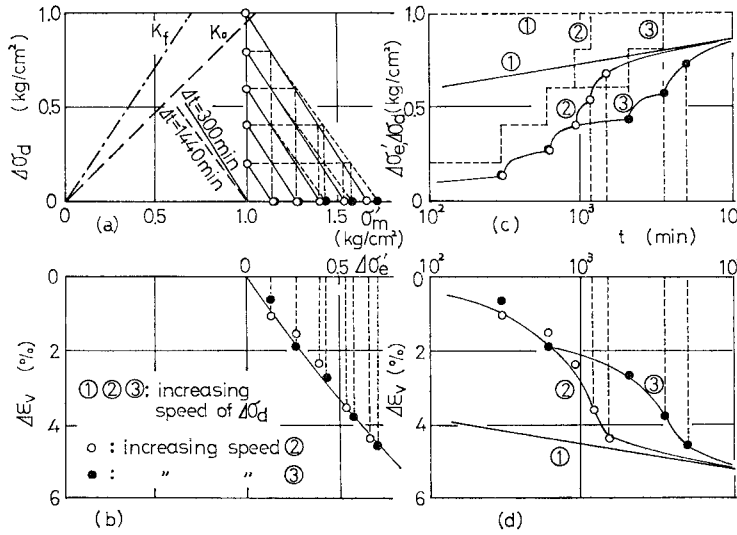


図-12 等価有効応力-体積ひずみ-時間関係

られた場合、②  $\Delta\sigma_d=0.2 \text{ kg/cm}^2$  ずつ 300 min の等時間間隔で  $1 \text{ kg/cm}^2$  まで荷重された場合、および ③ 最初の2段階を 300 min、後の3段階を 1440 min の等時間間隔で  $\Delta\sigma_d=0.2 \text{ kg/cm}^2$  ずつ  $1 \text{ kg/cm}^2$  まで荷重した場合の主応力差の時間変化を示したものである。

これに対し各段階終了時の  $\Delta\sigma_e'$  を 図-12(a) から求めてプロットすると、図-12(c) に実線で示した  $\Delta\sigma_e'$ - $t$  関係が得られる。このうち、② および ③ の最終段階終了以降の  $\Delta\sigma_e'$ - $t$  関係は、終了時における  $\Delta\sigma_e'$  と同じ値を示す ① との時間差がその後も続くとして描いたものである。

$\Delta\sigma_e'$  によって生じる  $\Delta\varepsilon_v$  は、式 (11) から得られるが、図-12(b) に実線で示した  $\Delta\sigma_e'$ - $\Delta\varepsilon_v$  関係を 図-12(c) に適用して、①、② および ③ に対応する  $\Delta\varepsilon_v$ - $t$  関係を求めると 図-12(d) の実線が得られ測定値とかなりよい一致を示している。

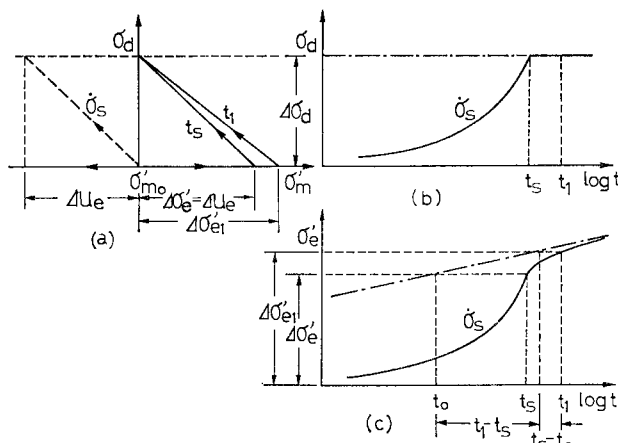


図-13 緩速荷重 ( $du=0$ )

(2) ダイレイタンスーに基づく等価有効応力の時間依存性

4. (1) (b) に示した実験結果と考察から明らかなように、異方応力を受けた土要素の圧密によって生じる体積変化は、等価有効応力の増分に比例する。

等価有効応力の増分がダイレイタンスーに伴って時間に依存することから、圧密によって生じる体積ひずみは圧密排水速度だけでなく、ダイレイタンスーに伴う時間に依存することになる。以下、等価有効応力の時間依存性についてさらに考察を加える。

図-13(c) は、排水状態にした土要素の  $\sigma_m$  を一定にして、図-13(b) に示した  $\Delta\sigma_d$  まで、過剰間隙水圧の残留しない速度  $\dot{\sigma}_s$  で緩速荷重した場合と、瞬間荷重した場合の  $\Delta\sigma_e'$ - $\log t$  関係を比較したものである。3. (2) で明らかにしたようにダイレイタンスー係数は排水条件には関係しない。したがって、 $\dot{\sigma}_s$  で  $\Delta\sigma_d$  まで荷重し、時間  $t_s$  に達したときの  $\Delta\sigma_e'$  は、図-13(a) に示したように非排水状態で同じ条件の荷重を行ったとき発生する  $\Delta u_e$  に等しい。この  $\Delta\sigma_e' = \Delta u_e$  の関係を用いると 図-13(c) に実線で示した  $\Delta\sigma_e'$ - $\log t$  関係が得られる。同様にして瞬間荷重の場合についても、非排水クリープ試験結果を用いて、図-13(c) に鎖線で示した  $\Delta\sigma_e'$ - $\log t$  関係が求められる。

以上から  $\dot{\sigma}_s$  で  $\Delta\sigma_d$  まで荷重し、時間  $t_s$  に達した後  $\Delta\sigma_d$  一定のまま放置したときに、等価有効応力が任意の  $\Delta\sigma_{ei}'$  に達する時間  $t_i$  は、瞬間荷重における  $\Delta\sigma_e'$ - $\log t$  関係を用い 図-13(c) に示したようにすることができる。

図-13 の場合と同じ排水状態のもとで、 $\dot{\sigma}_s$  より速い速度  $\dot{\sigma}_q$  で急速荷重し、 $t_q$  後  $\Delta\sigma_d$  に達したとき土要素に水圧  $du$  が残留している場合の応力経路は、図-14(a) の破線で示され、等価有効応力増分は  $\Delta\sigma_e'$  である。時間  $t_q$  までの発生過剰間隙水圧増分  $\Delta u_e$  または等価応力増分  $\Delta\sigma_e$  および等価有効応力増分  $\Delta\sigma_e'$  の時間経路は、それぞれ 図-14(c) の破線および実線で示される。時間  $t_q$  以後主応力差が一定値を維持する間の等価有効応力の時間経路は、残留過剰間隙水圧  $du$  が零になる  $t_1$  までは土要素の圧密排水速度に支配され、以後はクリープに伴うダイレイタンスー

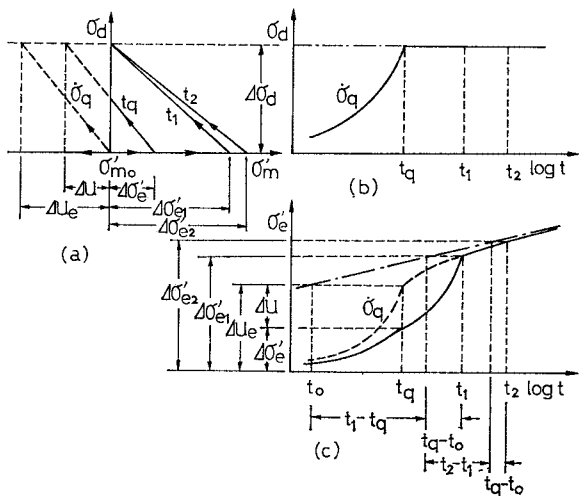


図-14 急速荷荷 ( $\Delta u$ )

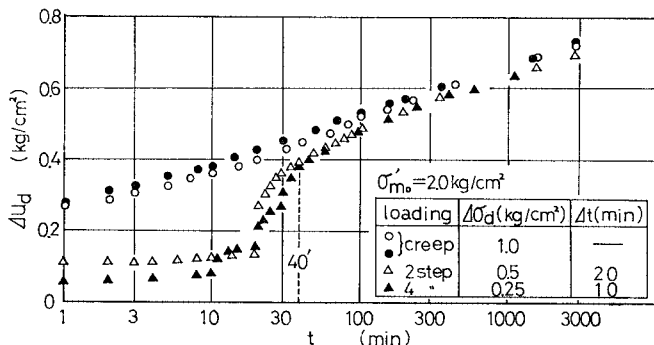


図-15  $\Delta u_d-t$  関係

に依存して、図-14(c) に示す実線をたどって増加する。

なお、図-15 は以上の考察を確かめるため、練返し飽和粘土 ( $w_L=103\%$ ,  $I_P=53\%$ ) を用い、非排水条件下で  $\sigma_m$  一定のまま  $\sigma_d$  を増すクリープ試験と段階荷荷 (2, 4 段階) による圧縮試験を行って求めた  $\Delta u_d$  と時間  $t$  の関係を比較したものである。

排水条件下で主応力差を増したときの等価有効応力の時間依存性は、非排水条件下で得た 図-15 の関係に  $D=D_d$  を導入することによって容易に見出すことができる。

また、図-14 に見られる等価応力  $\sigma_e$  および等価有効応力  $\sigma'_e$  の時間関係は二次圧密現象の解析に役立つことも可能である。

### 5. ま と め

粘土の応力-ひずみ-時間関係が過剰間隙水圧による有効応力の変化だけでなく、せん断変形に伴うダイレイタ

ンシーに大きく依存することに注目し、均質等方な正規圧密飽和粘土を用いた実験を行って、応力および体積変化のダイレイタンスによる時間依存性を考察し次の結論を得た。

(1) 非排水状態の土要素に発生する過剰間隙水圧は、平均主応力によって即時的に生じる過剰間隙水圧と主応力差による変形に伴うダイレイタンスによって経時的に生じる過剰間隙水圧の和として次のように表わせる。

$$\Delta u_e = \Delta \sigma_m + D \cdot \Delta \sigma_d$$

(2) 排水状態の土要素内で増加する有効応力は、土要素に残留している過剰間隙水圧を  $\Delta u$  としたとき、有効平均主応力と排水に伴う変形に基づくダイレイタンスによって経時的に生じる有効応力の和として次のように表わせる。

$$\Delta \sigma'_e = \Delta \sigma'_m + D_d \cdot \Delta \sigma_d$$

(3) 飽和粘土の圧密は、発生した過剰間隙水圧  $\Delta u_e$  の減少すなわち等方有効応力  $\Delta \sigma'_e$  の増加に伴う体積変化であるから、 $\Delta \sigma'_e$  を等価有効応力増分、 $\Delta \sigma'_e + \Delta u = \Delta \sigma_e$  を等価応力増分と定義した。

(4) 非排水状態で瞬間的に荷荷するクリープ試験によって得られるダイレイタンス係数  $D$  は、経過時間の対数に対して直線的に増加する。非排水状態で漸増段階荷荷を行った圧縮試験から得られる  $D$  と経過時間の関係は、荷荷速度が遅くせん断中にダイレイタンスが十分発揮されるときは、クリープ試験の場合と一致する。

(5) 排水状態の異方圧密試験から得られるダイレイタンス係数  $D_d$  は、荷荷後の経過時間または荷荷速度の等しい非排水状態のクリープ試験または圧縮試験から得られる  $D$  に一致する。

(6) 正規圧密飽和粘土のダイレイタンスが時間に依存するため、作用する外力が一定であっても等価有効応力は時間とともに変化する。したがって、圧密によって生じる体積変化は排水速度だけでなくダイレイタンスの時間依存性の影響を受ける。

(7) 圧密中における主応力差の増加に伴う負のダイレイタンスによって生じる体積ひずみとその時間変化は、主応力差増加速度の等しい非排水時のダイレイタンス係数  $D$  を用いて求めた等価有効応力とその時間変化から誘導することができる。

終りにあたり、本研究の実験に協力していただいた大学院生 寒河江健也君 (現・日本国有鉄道) に対し感謝の意を表したい。



【記 号】

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 主応力  
 $\sigma_m$  : 平均主応力  
 $\sigma_m'$  : 平均有効主応力  
 $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  : 主応力差  
 $B$  : 間隙圧係数  
 $D$  : 非排水状態におけるダイレイタンスー係数  
 $D_d$  : 排水状態におけるダイレイタンスー係数  
 $\Delta u_e$  : 軸対称主応力の増加によって非排水状態の正規圧密粘土に発生する過剰間隙水圧  
 $\Delta u_m$  : 主応力増分  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$  による土要素の弾性的変形に伴って即時的に生じる過剰間隙水圧.  
 $\Delta u_d$  : 主応力差増分  $\Delta\sigma_d$  による土要素の塑性的変形に伴って経時的に生じる過剰間隙水圧.  
 $\Delta u$  : 残留過剰間隙水圧  
 $\sigma_e$  : 等価応力  
 $\sigma_e'$  : 等価有効応力  
 $\sigma_{m0} (= \sigma_{m0}')$  : 初期平均主応力.  
 $\varepsilon_v$  : 体積ひずみ  
 $K$  : 主応力比

$e, e_K$  : 間隙比

$C_c$  : 圧縮指数

$m_v^*$  : 等価有効応力に対して定義した体積圧縮係数

$\dot{\sigma} (= \Delta\sigma_d / \Delta t)$  : 主応力差  $\sigma_d$  の増加速度

参 考 文 献

- 1) Skempton, A.W. : The pore pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, No. 4, pp. 143~147, 1953.
- 2) Henkel, D.J. : The shear strength of saturated remoulded clays, *Research Conference on Shear Strength Cohesive Soils*, ASCE, Colorado, pp. 533~554, 1960.
- 3) 稲田倍徳 : 飽和粘土のせん断変形と圧密による強さの増加, *土と基礎*, Vol. 15, No. 8, pp. 21~29, 1967.
- 4) Skempton, A.W. and A.W. Bishop : *Soils*, Chapter X of *Building Materials*, 1954.
- 5) 柴田 徹・松尾 稔 : 粘土のダイレイタンスー, 第11回レオロジー討論会講演概要, pp. 50~60, 1962.
- 6) 稲田倍徳・赤石 勝・張 恵文 : 非排水せん断の応力ひずみ-時間関係に及ぼす載荷段階の影響, *東海大学紀要(工学部)* 1977-2, pp. 187~193, 1978.
- 7) 稲田倍徳・赤石 勝・外崎 明・寒河江健也 : 正規圧密粘土の強度増加率, *東海大学紀要(工学部)* 1978-2, pp. 129~142, 1979.
- 8) 稲田倍徳・赤石 勝・張 恵文 : 飽和粘土の異方圧密中に生じるダイレイタンスー, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp. 193~196, 1978.

(1979.6.15・受付)