

## 論文

## 繰返し荷重を受けた有機質火山灰土の力学特性

北 園 芳 人\*  
鈴 木 敦 巳\*\*

Mechanical Property of Organic Volcanic  
Ash Soils under Repeated Loading

Yoshito KITAZONO  
Atsumi SUZUKI

## 1. ま え が き

近年、交通量の激増に従って道路交通の占める役割りは重要性を増してきている。特に交通車輛の数の増加のみでなく、重量化や高速化の傾向が著しいので、このような交通に適した路床・路盤の設計には、種々の大きさの急速な応力を繰返しを受けた土の力学的性質について十分知られていなければならない。

このような観点から研究が進められ、その結果、低含水比の不飽和土が繰返し荷重を受けた場合、供試体の主要な性質に生じる変化は、繰返し初期に生じ、載荷法によってヒズミ量が異なる。載荷後の圧縮強度・変形係数が増加し、応力-ひずみ曲線が変化する。またこれらの変化は、飽和度・含水比・締固め密度によって影響を受ける<sup>1)</sup>。これらの変化は、土の構造変化によるものと考えられ、硬化現象が生じ、最大効果を示すような繰返し応力度が存在する<sup>2)</sup>。繰返し載荷中の応力-ひずみ曲線において変曲点が現われ、それぞれの変曲点において、硬化現象と疲労現象とに区別され、土の変形がある一定の量に達するまでの時間を予測する方法も提案されている<sup>3)</sup>。一方、飽和粘性土の場合は流動化を起こす飽和砂の挙動と類似しており、小さい繰返し応力度でも載荷回数の増加によって疲労現象が生じ疲労破壊を起こす<sup>4),5)</sup>ことなどが報告されている。

これらの研究に対して、火山灰質粘性土の場合、どのような傾向を示すか興味ある問題である。すなわち火山灰質粘性土は、主要粘土鉱物として、比表面積の多いアロフェンを含んでいるため高含水比を示す。また、乾燥過程における非可逆的な土質工学的性質の変化、圧縮強度に対する繰返し効果が著しい<sup>6)</sup>。そしてこれらの火山灰質粘性土の特異性が繰返し載荷に対してどのような影響を示すか問題となる。そこで、上記の研究結果を参考にして、多量の有機物を含むため、その特異性がさらに顕著な有機質火山灰土(通称・黒ボク)に対して非排水繰返し載荷試験を行ない、その力学的特性について若干の考察を行なったのでここに報告する。

## 2. 試料および供試体

試料は熊本県阿蘇郡産山村で採取した有機質火山灰土(通称・黒ボク<産山黒I>)を用いた。物理的性質・試験前の供試体の諸元は表-1のとおりである。供試体は試料を10mmフルイを通過するまでほぐし、三軸用三割モールドを用いて、突固め試験(JIS A 1210)<sup>7)</sup>相当のエネルギーで突固めて高さ125mm・直径50mmのものを作製、そして、シキソトロビーによるばらつきを防ぐためにビニールでシールしたあと、

\* 助手 土木工学教室

\*\* 助教授 工博 土木工学教室

表1 試料の物理的性質と供試体の諸元

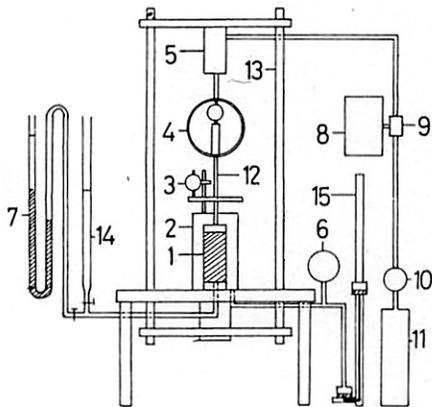
物理的性質	自然含水比	250%
	比重	2.37
	液性限界	258%
	塑性限界	186%
供試体	有機物	32%
	含水比	235~241%
	乾燥密度	0.33~0.34 g/cm <sup>3</sup>
	間ゲキ比	5.93~6.08
	飽和度	92.8~95.3%

養生室(20°C)で一週間以上養生行なったあと試験に使用した。

### 3. 試験装置

この試験に用いた繰返し荷重装置の機構の概要は、図-1のとおりである。普通の三軸圧縮試験機を改良し、ペロフラムシリンダー⑤を取付けたものである。

供試体①を三軸セル②内にセットし、拘束圧( $\sigma_3$ )を等方的にかける。その際、拘束圧( $\sigma_3$ )は液圧計⑥とイギリス型定液圧装置⑮で調節し、液圧でロッド⑫が浮き上がらないように $\sigma_3$ に等しい荷重を載せる。等方圧



- |              |               |
|--------------|---------------|
| 1 供試体        | 9 排気弁         |
| 2 三軸セル       | 10 調圧弁        |
| 3 ダイアルゲージ    | 11 蓄圧タンク      |
| 4 プルーピングリング  | 12 ロッド        |
| 5 ペロフラムシリンダー | 13 フレーム       |
| 6 液圧針        | 14 ビューレット     |
| 7 水銀マンメーター   | 15 イギリス型定液圧装置 |
| 8 発信器        |               |

図1 試験装置の概要

による軸方向圧縮量はダイヤルゲージ③で測定し、体積変化はビューレット⑭で測定する。繰返し荷重はロッド⑫とプルーピングリング④を介して、ペロフラムシリンダー⑤によって空気圧を加える。その場合、荷重、除荷は所定の時間にセットした発信器⑧を用いて自動的に排気弁⑨を開閉することによって行なう。荷重強さは、調圧弁⑩で空気圧を調節し、プルーピングリング④の読みで決定する。また荷重中の開ゲキ水圧の変化は水銀マンメーター⑦で測定する。繰返し終了後、ペロフラムシリンダー⑤を取り外し、プルーピングリング④をフレーム⑬に固定し、非排水三軸圧縮試験を行なう。

### 4. 試験方法

試験の種類と順序を図-2のようになる。

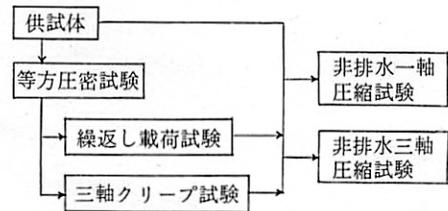


図2 試験の種類と順序

○非排水一軸圧縮試験は三軸用供試体で $\sigma_3=0\text{kg/cm}^2$ で行なった非排水三軸圧縮試験。

○等方圧密試験は $\sigma_3$ で等方圧密( $\sigma_1 = \sigma_3$ )を行なう。圧密時間は一次圧密が終了する5時間、 $\sigma_3$ は0.5・1.0・1.5kg/cm<sup>2</sup>の3種類とする。

○繰返し荷重試験は荷重0.5秒・除荷0.5秒の周期1.0秒、荷重回数は原則として10万回。荷重強さ( $\sigma_r$ )は、等方圧密供試体の非排水三軸圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ の比で表わし各拘束圧で6種類とする。

○クリープ試験は繰返し荷重試験と比較するために行なうもので、荷重時間は繰返し荷重時間10万秒(=10万回)の有効荷重時間に相当する5万秒。荷重強さは繰返し荷重試験と同じ。

○各試験後、非排水三軸圧縮試験を行なった。

### 5. 試験結果

#### 5.1 非排水三軸圧縮試験

繰返し載荷試験を行なうにあたって、その効果を明確にするために、非圧密非排水三軸圧縮試験を行なった。その結果は図-3 のとおりである。σ<sub>3</sub>=0.5kg/cm<sup>2</sup>以下では突固めた供試体であるため、不飽和であること、突固めたことによる先行荷重の影響が残り、σ<sub>3</sub>=1.0kg/cm<sup>2</sup>以上になると間ゲキ中の空気がより多く間ゲキ水中に溶解込み飽和状態になるため、σ<sub>3</sub>の増加とともに増加率が減少するものと考えられる。

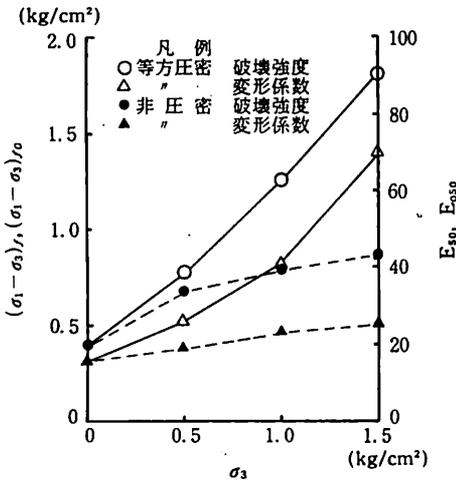


図3 等方圧密前後の非排水三軸圧縮強度と変形係数

5・2 等方圧密非排水三軸圧縮試験

繰返し載荷を行なう前に σ<sub>3</sub> = 0.5・1.0・1.5kg/cm<sup>2</sup> で等方圧密を行なった。繰返し載荷を非排水三軸試験で行なう場合、10万回 (約28時間) という長時間に渡って拘束圧を受けることになる。有機質火山灰土は、多量の有機物や粘土鉱物 (特に非結晶質のアロフェン) のために、非常に含水比が高く、突固めた場合でも間ゲキ比が大きい。そのために、圧密による圧縮量が大きく、非圧密繰返し載荷試験の載荷回数-ヒズミ曲線<sup>9)</sup>を見ると、拘束圧によるヒズミが考えられる。そこで、繰返し載荷中に拘束圧によって生じる圧縮の影響をできるだけ除去するために、また、突固め時に起こる応力集中をなくし、有効応力の初期状態を均一にする目的で等方圧密 (σ<sub>1</sub> = σ<sub>3</sub>) を行なった。等方圧密時間は一次圧密がほぼ終了したとみなされる (図-4) 5時間とし、軸方向圧縮量 (ε<sub>1</sub>) をダイヤルゲージで測定した。ε<sub>1</sub> を測定するのに拘束圧 (σ<sub>3</sub>) によるロッドの浮上が

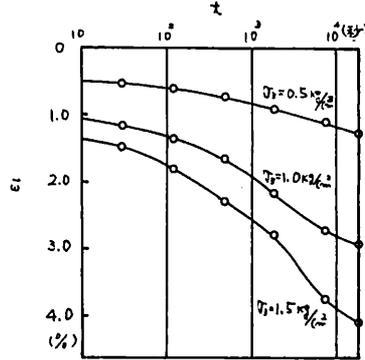


図4 等方圧密による圧密時間・沈下曲線 (ε<sub>1</sub> - log t 曲線)

りを防がねばならず、そのために各拘束圧と同じ荷重強さをロッドに載せる。ε<sub>1</sub> は σ<sub>3</sub> = 0.5kg/cm<sup>2</sup> で1.3%, 1.0kg/cm<sup>2</sup> で2.8%, 1.5kg/cm<sup>2</sup> で4.2%となり、間ゲキ比が大きいためかなりの圧縮量である。等方圧密終了後、供試体を取り出して実測した場合の軸方向圧縮量 (ε<sub>1</sub>') は ε<sub>1</sub> の70~85%となり、ばらつきがある。その平均値によって等方圧密終了後の供試体の諸元を推定するのは疑問もあるが、一応の目安になる。なお、実測値によると側方圧縮ヒズミ (ε<sub>2</sub>') は各拘束圧とも、ε<sub>1</sub>' の70~80%である。等方圧密後の供試体諸元の実測値・推定値は表-2 のとおりである。

表2 供試体の等方圧密による諸元の変化

拘束圧			含水比%	乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>	間ゲキ比	飽和度%
0.5	圧密前	実測	237	0.339	5.98	93.8
		推定		0.358	5.61	97.8
	圧密後	実測	232	0.352	5.73	95.8
1.0	圧密前	実測	239	0.336	6.04	93.9
		推定		0.363	5.53	95.9
	圧密後	実測	221	0.360	5.57	94.0
1.5	圧密前	実測	237	0.338	6.00	93.7
		推定		0.380	5.23	98.5
	圧密後	実測	218	0.373	5.35	96.3

等方圧密後の実測供試体を考えると、飽和度 (S<sub>r</sub>) は試験前供試体に比較して、2%程度の増加しか示していない。しかし、推定値で考えるとほとんど97%以上になり、ほとんど飽和されたと考えてよいのではないだろうか<sup>9)</sup>。すなわち、実測値は供試体を取り出して σ<sub>3</sub> = 0kg/cm<sup>2</sup> の状態で測定したため、供試体が σ<sub>3</sub> の

除去により、膨張してしまい、正確な供試体寸法 ( $\sigma_3$  が作用している状態の供試体) の測定値とは考えられない。間ゲキ中の水や空気の排出により、間ゲキ比 ( $e$ ) では 4~11% の減少がみられ、乾燥密度 ( $\gamma_d$ ) では 4~10% の増加がみられる。この供試体の諸元の変化は、非排水三軸圧縮試験にも影響を与えているものと考えられる。等方圧密後の非排水三軸圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  と非圧密非排水三軸圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  との比較を図示すると図-3 のようになる。 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  で 15%,  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  で 60%,  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  で 100% の強度増加を示す。また、変形係数 ( $E_{o50}$ ) の増加は  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  で 40%,  $1.0 \text{ kg/cm}^2$  で 80%,  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  で 180% にもおよぶほど大きい。すなわち、 $\sigma_3$  で等方圧密されているため、間ゲキ空気は間ゲキ水中に溶け込んだり、排出されているため飽和状態にあるが、圧密によって有効応力が  $\sigma_3$  の増加に従って増加しているためほぼ直線的に  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$ ,  $E_{o50}$  が増加する。しかし、非圧密の場合、 $\sigma_3$  の増加に従って  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ,  $E_{o50}$  が増加しないため、 $\sigma_3$  が増加するほど等方圧密による  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$ ,  $E_{o50}$  の増加が著しくなる。

5・3 等方圧密非排水繰返し載荷試験

まず、載荷回数-全ヒズミ曲線 ( $\epsilon_t - \log N$  曲線) を考えると、 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  の場合、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.26$  以下では載荷回数  $N = 3 \times 10^3$  回前後で曲線勾配 ( $\gamma_e$ ) が増加しており、 $0.39 \leq \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.52$  では  $\gamma_e = \text{一定}$ 、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.65$  になると  $N = 2 \times 10^3$  回で破壊。 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  の場合、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.16$  以下で  $\gamma_e$  が増加し、 $0.32 \leq \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.64$  では  $\gamma_e = \text{一定}$  であるが繰返し荷重 ( $\sigma_r$ ) の大きい方がわずかではあるが  $\gamma_e$  が大きい。 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.80$  では  $N = 10^3$  回で破壊する。 $\sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  の場合、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.18$  以下で  $\gamma_e$  が増加し、 $0.35 \leq \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.53$  では  $\gamma_e = \text{一定}$ 、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.71$  以上では、 $N = 5 \times 10^2 \sim 10^3$  回までは著しいヒズミ増加、供試体の変形がみられ、破壊と思われる。しかし、それ以降は  $\gamma_e$  が減少し落ち着く傾向がみられ、 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$  以下とは異なった傾向を示す。これは、 $N = 10^3$  回以降は  $\sigma_3$  が大きいため、一度破壊した供試体が、繰返しによって再圧密・再突固めされたのではないかと考えられる (載荷終了後の供試体とゴム膜の間には水膜が発生していた)。

この  $\epsilon_t - \log N$  曲線の形状を他の土と比較すると、

不飽和ローム<sup>2)</sup>の一軸供試体による繰返し試験の  $\epsilon_t - \log N$  曲線とよく似ている。また、破壊に至る繰返し荷重は有機質火山灰土の場合、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.65 \sim 0.71$ ,  $N = 10^3 \sim 2 \times 10^3$  回と考えられ、非圧密の場合の  $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = 0.53$  で  $N = 2 \times 10^4$  回より<sup>3)</sup>、不飽和ロームの値<sup>2)</sup> ( $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_f = 80 \sim 90\%$ ・ $N \leq 10^3$  回) に近づいている。すなわち、等方圧密を一次圧密終了まで行なったことにより、自由水が排水されたた

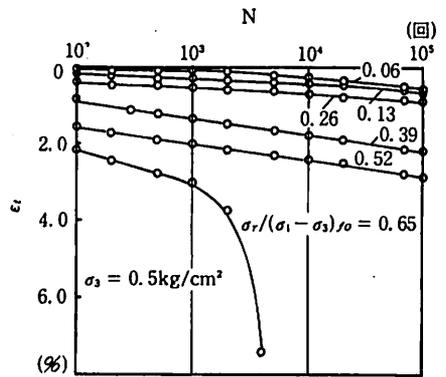


図5 繰返し載荷回数・全ヒズミ曲線 ( $\epsilon_t - \log N$  曲線)  $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

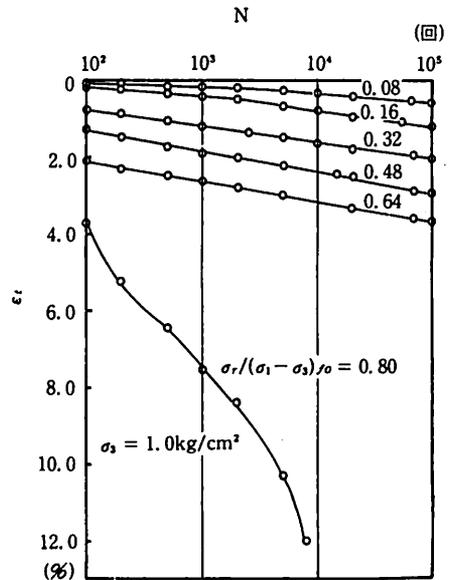


図6 繰返し載荷回数・全ヒズミ曲線 ( $\epsilon_t - \log N$  曲線)  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

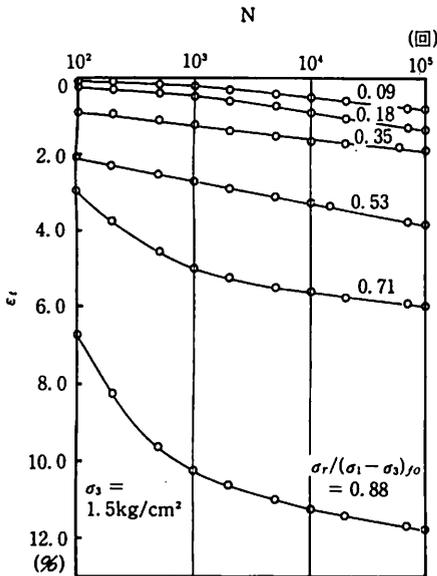


図7 繰返し載荷回数・全ヒズミ曲線(ε<sub>t</sub>-log N 曲線) σ<sub>3</sub> = 1.5kg/cm<sup>2</sup>

め、土粒子間の凝集力が増加し、土の強度に影響していると考えられる。しかし、飽和度が97%以上とほぼ飽和土に近いので、やや低い応力で破壊を起こすと考えられる。また、等方圧密を行なったため、圧密後の繰返し載荷中の σ<sub>3</sub> の影響はほとんど分離されたものと考えられる。

また、弾性ヒズミ(ε<sub>e</sub>)は、σ<sub>r</sub>/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> = 0.20 以下では ε<sub>e</sub> が小さいため、載荷回数による変化は明らかでない。しかし、σ<sub>r</sub>/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> = 0.50 付近を境界として、小さいときは、ε<sub>e</sub> が減少し、大きいときは、ε<sub>e</sub> は増加する。ただし、σ<sub>3</sub> = 1.5kg/cm<sup>2</sup> の場合、ε<sub>t</sub> - log N 曲線の変化からも考えられるが、σ<sub>r</sub>/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> = 0.70 以上になると N = 5 × 10<sup>2</sup> 回以降、ε<sub>e</sub> が著しく減少している。

繰返し載荷後の非排水三軸圧縮強度 (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub> と (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> を比較した場合、σ<sub>3</sub> = 0.5kg/cm<sup>2</sup> で最高 27%、σ<sub>3</sub> = 1.0kg/cm<sup>2</sup> で 16%、σ<sub>3</sub> = 1.5kg/cm<sup>2</sup> で 11%と増加しているが、σ<sub>r</sub> の変化による (σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> の変化は顕著ではない。さらに繰返し載荷後の変形係数 E<sub>50R</sub> を考えると、E<sub>500</sub> に比較して、σ<sub>r</sub>/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> = 0.10~0.50 の間で 100~170% という顕著な増加を示す。しかし、σ<sub>r</sub>/(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>0</sub> = 0.10 以下と 0.65 以上ではほとんど増加がみられない。

これらのことから、荷重強さ(σ<sub>r</sub>)の増加に従って

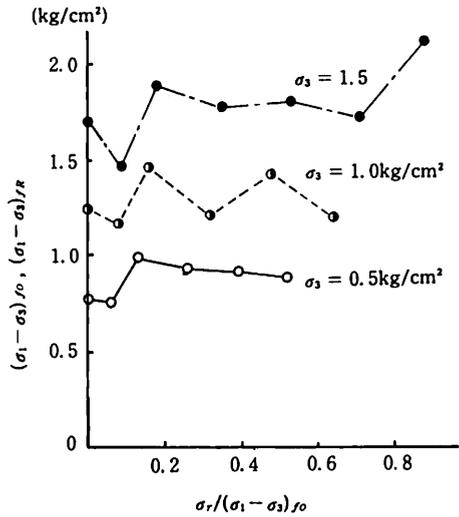


図8 繰返し載荷後の非排水三軸圧縮強度

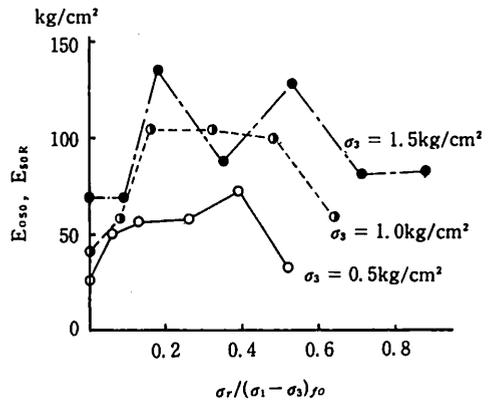


図9 繰返し載荷後の変形係数

全ヒズミ(ε<sub>t</sub>)は増加するが、破壊強度(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>は増加せず、ε<sub>t</sub>と(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>との直接の関係はないと考えられる。また、(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>に比較して、E<sub>50R</sub>の増加が顕著であることは、「繰返し載荷を受けた場合、(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>が増加するだけでなく、応力-ひずみ曲線の勾配も増加してくる。しかし、応力-ひずみ曲線は飽和度の影響を受け、飽和度の高い場合、繰返し載荷を受けた土では、初期の弾性率(≒ E<sub>50R</sub>)は大きい(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>は必ずしも増加していない。」という Seed の研究報告<sup>1)</sup>と一致する。すなわち、有機質火山灰土は高飽和度であるため、ひずみが増加すると過剰間ゲキ水圧が増加し、(σ<sub>1</sub>-σ<sub>3</sub>)<sub>FR</sub>には顕著な硬化効果が現われ

ない。 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR} = 0.10$  以下では繰返し荷重が小さいため、ほとんど繰返しの影響がみられない。さらに、 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.65$  以上では硬化現象より、疲労現象が卓越するため、 $E_{s0R}$  にほとんど増加がみられないものと考えられ、不飽和低含水比のロームだけでなく、有機質火山灰土においても、硬化効果を示す繰返し応力度が存在すると思われる。

5・4 等方圧密非排水クリープ試験

繰返し載荷試験による硬化現象が繰返しによる衝撃によるものであるかどうかを確かめるために、供試体・等方圧密・拘束圧・荷重強さ・有効載荷時間を同一条件で非排水三軸クリープ試験を行なった。

その結果、繰返し載荷とほぼ等しく、クリープ曲線 ( $\epsilon_c - \log T_c$  曲線) は、 $\sigma_c/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.20$  以下では、載荷時間が増加するとわずかでは  $\gamma_c$  が増加し、 $\sigma_c/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.25$  以上では載荷時間が増加しても、一定の  $\gamma_c$  でクリープヒズミ  $\epsilon_c$  が増加するだけである。そして繰返し載荷の場合、 $\sigma_c/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} = 0.65$

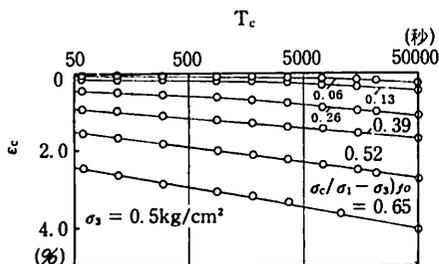


図10 クリープ試験の載荷時間・ヒズミ曲線 ( $\epsilon_c - \log T_c$  曲線)  $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$

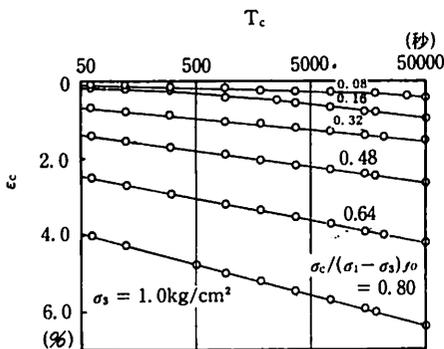


図11 クリープ試験の載荷時間・ヒズミ曲線 ( $\epsilon_c - \log T_c$  曲線)  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

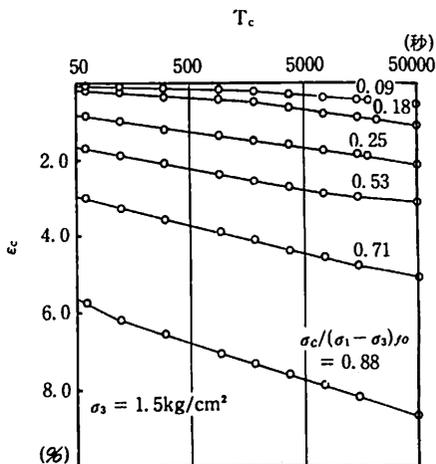


図12 クリープ試験の載荷時間・ヒズミ曲線 ( $\epsilon_c - \log T_c$  曲線)  $\sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$

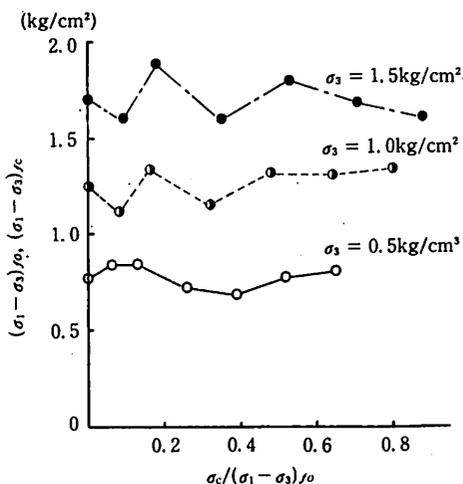


図13 クリープ試験後の非排水三軸圧縮強度

以上では破壊を起こすが、クリープの場合、破壊には至らず一定の  $\gamma_c$  で  $\epsilon_c$  が増加するだけである。また、 $\epsilon_c$  は  $\epsilon_t$  よりやや小さく、 $\gamma_c$  もクリープの方が小さい。そして、クリープ試験後の破壊強度 ( $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fc}$ ) については、ばらつきもあるが  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  とほぼ等しく、ほとんど強度増加はみとめられない。 $E_{s0c}$  については、 $E_{s00}$  に比較して、50~100%の増加がみとめられるが、これは  $E_{s0R}$  の増加の約 1/2 である。すなわち、クリープにおいても初期の弾性率に増加がみられることから、土粒子の配列変化や含有水分の物理特性

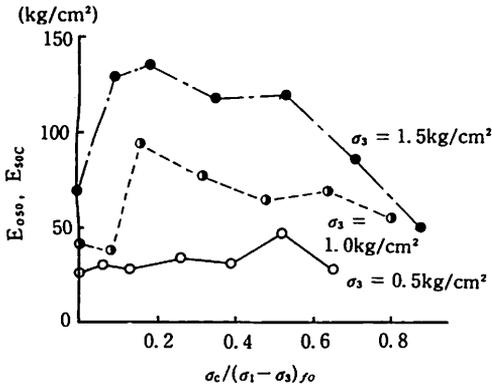


図14 クリープ試験後の変形係数

の変化は起こると考えられるが、その変化量は繰返し載荷にはおよばないことがわかる。

### 6. 考 察

1) 非排水三軸圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と等方圧密非排水三軸圧縮強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  を比較すると、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  は拘束圧  $(\sigma_3)$  に比例して増加しているが、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  の場合、 $\sigma_3 \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2$  で増加が小さい。これは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  の場合、突固めた供試体であるため、不飽和状態にあり、 $\sigma_3 \leq 0.5 \text{ kg/cm}^2$  では過剰間ゲキ水圧の発生が小さい。しかし、 $\sigma_3 \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2$  では間ゲキ空氣がより多く間ゲキ水中に溶け込み飽和度が高くなる。そして、非排水せん断試験を行なった場合、過剰間ゲキ水圧の増加に対して有効応力の増加が小さい (例えば、 $\Delta u = u_{\sigma_3=1.5} - u_{\sigma_3=0.5} = 0.30 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\Delta(\sigma'_1 - \sigma'_3) = 0.17 \text{ kg/cm}^2$ )。しかし、等方圧密後の飽和度は97%以上とほぼ飽和状態にあるが、間ゲキが減少し、土粒子間距離が短縮され有効応力が増加 ( $\Delta(\sigma'_1 - \sigma'_3) = 0.93 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\Delta u = 0.33 \text{ kg/cm}^2$ ) しているため、 $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$  と  $\sigma_3 = 1.5 \text{ kg/cm}^2$  では  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  と  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  でその増加率に大きな差が生じている。また、変形係数 ( $E_{s0}$ ,  $E_{s0c}$ ) は両者とも  $\sigma_3$  の増加に比例している。すなわち、圧縮試験において、ひずみが小さいときは、過剰間ゲキ水圧の影響が小さいことによるが、その増加率には、160%と430%と大きな差がある。これはやはり、等方圧密したことによって間ゲキ比が減少し、締固り土粒子間距離が短縮されたため、有効応力が大きく増加したためである。

2) 非圧密繰返し載荷試験と等方圧密繰返し載荷試

験を比較すると、載荷回数-全ヒズミ曲線 ( $\epsilon_t - \log N$  曲線) の形状が異なる。すなわち、前者は載荷回数  $N = 10^3 \sim 2 \times 10^4$  回と  $N = 10^4 \sim 2 \times 10^4$  回の2ヶ所で曲線勾配 ( $\gamma_c$ ) が変化し、圧密時間-沈下曲線 ( $\epsilon - \log t$  曲線) と類似している。後者は、 $\gamma_c$  の変化がみられず、全ヒズミ ( $\epsilon_t$ ) の増加は対数目盛上でほぼ直線となる。これは、非圧密の場合、飽和度がやや低く自由水や間ゲキ空氣が圧密したものより多いため、 $\sigma_3$  の影響を受けやすく圧縮ヒズミとして、繰返し載荷による圧縮に加わるために、軸方向圧縮量は大きくなり  $\gamma_c$  にも変化が起こる。すなわち、 $\gamma_c$  の変化は  $\sigma_3$  の増加に従ってはっきりしてくる。等方圧密は  $\sigma_3$  で圧密されているため、繰返し中の  $\sigma_3$  による過剰間ゲキ水圧の発生は考えられない。すなわち、 $\sigma_3$  による圧縮はほとんど分離されたものと考えられ、軸方向圧縮量は大部分が繰返しによって生じたものと考えられる。これが  $\epsilon_t - \log N$  曲線の形状の差となり、低飽和度のローム<sup>2)</sup>や砂質ローム<sup>3)</sup>等の一軸供試体による繰返し載荷と同様な形状を、等方圧密繰返し載荷が示めすようになったと考えられる。なお、非圧密繰返しによる全ヒズミ ( $\epsilon_{tu}$ ) と等方圧密繰返しによる全ヒズミ ( $\epsilon_{tr}$ ) を比較すると、 $\epsilon_{tu}$  に  $\sigma_3$  によるヒズミが含まれていると考えられるため、 $\epsilon_{tu} > \epsilon_{tr}$  であるが等方圧密による軸方向圧縮量 ( $\epsilon_t$ ) を加えると  $\epsilon_t + \epsilon_{tr} > \epsilon_{tu}$  となる。

3)  $N = 10^5$  回で破壊を起こさない許容繰返し荷重強さは、表-3のようになる。有機質火山灰土は飽和度が95%、含水比が235%と高飽和度・高含水比であるが、『自由水のみが液相として働き、準拘束水および拘束水は固相として働く』という仮定が成り立つ<sup>6)</sup>

表3 許容繰返し荷重強さ(載荷回数  $N = 10^5$  回)

土の種類		荷重強さ $\sigma_r / (\sigma - \sigma_3)_f$	載荷回数 $N$
有機質 火山灰土	非圧密	0.40	破壊せず
		0.53	$2 \times 10^4$
		0.70	$5 \times 10^3$
火山灰土	等方圧密	0.60	破壊せず
		0.65	$2 \times 10^3$
		0.80	$10^3$
飽和粘性土		0.40	250
不飽和ローム		0.70	破壊せず
		0.80	$10^3$

とするならば、含有水分のうち自由水は25%となり、準拘束水と拘束水が75%となる。そして、土粒子・準拘束水・拘束水を「仮想固相」それ以外を「有効間ゲキ」とし、「有効飽和度」を求めると26%となり低飽和度の土とみなされる。すなわち、飽和粘性土とは異なり、低飽和粘性土とみなされるが、比較的により自由水へ転化しやすい準拘束水が  $N$  の増加に伴い自由水化し、有効飽和度が増加するとともに有効応力が減少するため、小さい荷重強さ・大きい載荷回数で破壊するのではないかと、等方圧密した場合、自由水が排水され有効応力が増加しているため、準拘束水の自由水化が起こっても有効応力の低下が小さいため、大きい荷重強さにならないと破壊しない。そして、含水比が高いため土粒子間力が弱く、圧縮強度が低い場合  $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  が低含水比不飽和ロームの  $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  に近づいても荷重強さ ( $\sigma_r$ ) は小さい、と、というようなことが推測される。

4) 非排水三軸クリープ試験結果について、まず、ヒズミ-載荷時間曲線 ( $\epsilon_c - \log T_c$  曲線) を考えると、 $\epsilon_c - \log N$  曲線とほぼ同じ傾向にある。しかし、 $\epsilon_c$  は有効載荷時間で比較した場合、わずかに  $\epsilon_t$  の方が大きい。また、 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \geq 0.65$  になると繰返し載荷試験の場合は、 $\gamma_e$  が急激に増大し破壊を起こすが、非排水三軸クリープ試験の場合は、 $\gamma_e$  は一定で  $\epsilon_c - \log T_c$  曲線は直線となり、破壊には至らない。つまり、繰返し載荷試験の方が許容荷重が小さく、同じ荷重強さの場合、土の変形に与える影響が大きい。

また、載荷後の非排水三軸圧縮試験結果を見ると、 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} < 0.1$  では繰返し載荷供試体の破壊強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$  とクリープ供試体の破壊強度  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fC}$  とは差がなく、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  とほとんど変わらず強度増加はみられない。  $0.1 < \sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.5$  では  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$  の方が大きく、 $\sigma_3$  が小さい程、その差が大きい傾向にあり、繰返し載荷の影響が現われていると考えられる。しかし、 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} > 0.5$  になると再び両者の差がなくなり、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  に対しても強度増加がみられなくなる。つまり、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fC}$  はほとんど強度増加がみられず、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$  にしても最高25%前後の強度増加しかみられない。

しかし、変形係数 ( $E_{50}$ ) を考えると、 $0.1 < \sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} < 0.5$  では、 $E_{50R}$  (繰返し) の場合、 $E_{50C}$  の100~170%という顕著な増加を示し、 $E_{50C}$  (クリープ) の場合でも  $E_{50C}$  の50~100%の増加がみられ、初期強度

については、両者とも増加する傾向にある。しかし、その増加率は  $E_{50R} > E_{50C}$  である。そして、 $\sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} > 0.5$  になると  $E_{50R}$  の低下が著しく、 $E_{50C}$  と逆転する傾向にあり、繰返しによる疲労が硬化より卓越していることを示している。

すなわち、繰返し効果は土粒子の締固りだけでなく、供試体内部での水分の分布の微視的変化の促進による土粒子間に働く電位エネルギーの変化、土粒子の配列の変化などにも影響を与えているものと考えられる。

5) 載荷回数 ( $N$ ) または載荷時間 ( $T_c$ ) をパラメータとして、荷重強さ ( $\sigma_r$  または  $\sigma_c$ ) とヒズミ ( $\epsilon_t$  または  $\epsilon_c$ ) の関係曲線 ( $\sigma_r - \epsilon_t$ ,  $\sigma_c - \epsilon_c$ ) を描くと図-15, 16 のようになる。太い実線は等方圧密供試体の非排水三軸圧密試験の応力-ひずみ曲線 ( $\sigma_0 - \epsilon$ ) である。

$\sigma_0 - \epsilon$  曲線は一般の突固め土の応力-ひずみ曲線と類似して、非弾性的な傾向を示している。 $\sigma_c - \epsilon_c$  曲線を考えると、 $\sigma_0 - \epsilon$  曲線と類似しており、 $T_c$  の増加に従って傾きは緩やかになる。しかし、 $\sigma_r - \epsilon_t$  曲線の場合

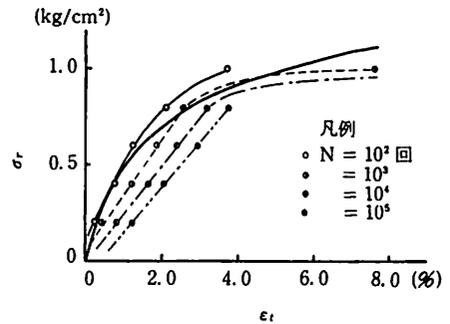


図15 繰返し載荷荷重・全ヒズミ曲線 ( $\sigma_r - \epsilon_t$  曲線)  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

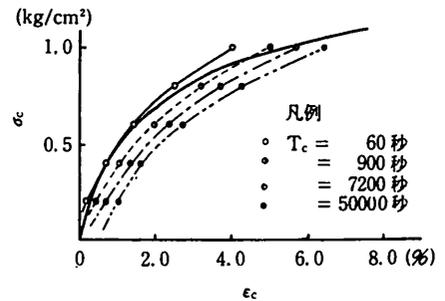


図16 クリープ荷重・ヒズミ曲線 ( $\sigma_c - \epsilon_c$  曲線)  $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$

合は、低い荷重強さでは  $\sigma_r - \epsilon_c$  曲線が直線となり、許容応力度を越えると急激にヒズミが増加し破壊に至り、弾塑性体の傾向を示す。同様に砂質ロームの場合<sup>3)</sup>を考えると、 $\sigma_r - \epsilon_c$  曲線の形状は、載荷周期によって影響を受けると考えられ、周期の短い場合は弾塑性体の傾向を示し、長い場合は、一般の突固め土の応力-ひずみ曲線に類似してくる。これらのことから、有機質火山灰土においても、載荷周期の影響を受けることが十分に考えられる。

さらに、砂質粘土ローム<sup>3)</sup>は低含水比不飽和土であるため、ある荷重強さの範囲では、 $\epsilon_c$  が著しく増加し、締固りや土粒子間の配列変化が起こり、硬化効果が進行すると報告されている。しかし、有機質火山灰土では、自由水の他に多量の拘束水および準拘束水を保持しており、間ゲキ比が大きく、飽和度が高いため、また、多量の有機物のため、著しい硬化効果は期待できないと考えられる。

6) 弾性ヒズミ ( $\epsilon_e$ ) = 全ヒズミ ( $\epsilon_t$ ) - 残留ヒズミ ( $\epsilon_p$ ) とすると、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  の増大に従って  $\epsilon_e$  は増加する。また  $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} < 0.15$  以下では、 $\epsilon_e$  が小さいため、 $N$  の増加に従う  $\epsilon_e$  の減少の顕著な変化は現われにくい。  $0.2 < \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.5$  になると  $\epsilon_e$  の減少に変化が現われ、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$  の大きいものほど少ない載荷回数ところで減少率が大きくなり、その後は落ち着きほとんど減少しなくなる。すなわち、減少率の大きいところは、土粒子の構造変化も急激に進むところと考えられ、その後の落ち着きは構造変化の終了を示めすものと考えられる。  $0.5 < \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} < 0.65$  では  $\epsilon_e$  の減少が不安定であり、 $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0}$

$\geq 0.65$  では  $\epsilon_e$  は  $N$  の増加に従って増加する。つまり、載荷後の圧縮試験結果とほぼ一致し、 $0.2 < \sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \geq 0.5$  では土粒子の構造変化等による硬化効果が現われると考えられる。また、不飽和ロームの場合<sup>2)</sup>は、 $\epsilon_e$  の急激な減少のあと  $N = 10^5$  回でも減少する傾向にあるが、有機質火山灰土の場合は多量の拘束水、準拘束水と96%以上の飽和度のため、不飽和ロームに比べて、土粒子の構造変化は小さく、少ない載荷回数で構造変化が終了すると考えられる。

### 7. ま と め

この研究から得られたことは次の通りである。

- 1) 非圧密と等方圧密供試体では  $\epsilon_c - \log N$  曲線が異なる。
- 2) 等方圧密供試体では、 $\epsilon_c - \log N$  曲線と  $\epsilon_c - \log T_c$  曲線は比較的類似しているが、ヒズミ量は繰返しの方がクリープよりわずかに大きい。
- 3) 繰返し試験における許容繰返し荷重は、非圧密の場合  $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_f \leq 0.5$  であり、等方圧密の場合  $\sigma_r / (\sigma_1 - \sigma_3)_{f0} \leq 0.65$  である。
- 4) 繰返しによる硬化効果は飽和度が高いため、不飽和ロームでみられる破壊強度の増加が、ほとんどみられず、変形係数の方に増加がみられる。
- 5) クリープ試験においても、変形係数について、繰返し試験の場合よりも小さいが、増加がみられる。
- 6)  $\sigma_r - \epsilon_c$  曲線と  $\sigma_c - \epsilon_c$  曲線の相違は載荷周期の影響と考えられるので、載荷周期を変化させた試験が必要である。
- 7) 弾性ヒズミ ( $\epsilon_e$ ) の減少が落ち着いたところが土粒子構造の変化の終了かどうかを調べるために載荷回数を変化させた試験が必要である。

#### 記号一覧表

- $e$ : 間ゲキ比
- $E_{50}, E_{50c}, E_{50s}, E_{50R}$ : 変形係数 (kg/cm<sup>2</sup>)
- $G_s$ : 比重
- $I_p$ : 塑性指数 (%)
- $N$ : 繰返し載荷回数
- $S_r$ : 飽和度 (%)
- $t$ : 圧密経過時間 (秒)
- $T_c$ : クリープ載荷時間 (秒)
- $\Delta u$ : 間ゲキ水圧の増分 (kg/cm<sup>2</sup>)

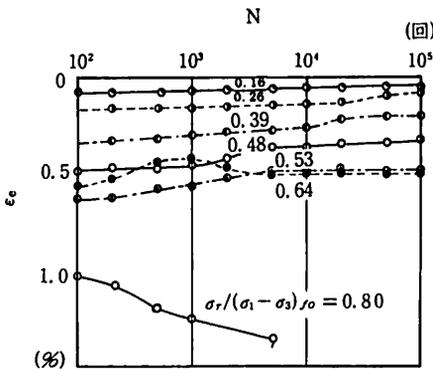


図17 繰返し載荷試験の載荷回数・弾性ヒズミ曲線 ( $\epsilon_e - \log N$  曲線)

$w$ : 含水比 (%)  
 $w_L$ : 液性限界 (%)  
 $w_p$ : 塑性限界 (%)  
 $\gamma_d$ : 乾燥密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $\gamma_c$ : 曲線勾配 ( $\epsilon_c/\log N$  または  $\epsilon_c/\log T_c$ )  
 $\epsilon$ : ひずみ  
 $\epsilon_c$ : クリープヒズミ  
 $\epsilon_e, \epsilon_p, \epsilon_t$ : 繰返し載荷による弾性ヒズミ, 残留ヒズミ, 全ヒズミ  
 $\epsilon_t, \epsilon'_t$ : 軸方向圧縮量 (ダイヤルゲージ, 実測値)  
 $\epsilon'_r$ : 側方圧縮ヒズミ (実測値)  
 $\epsilon_{tr}, \epsilon_{tu}$ : 全ヒズミ (等方圧密, 非圧密)  
 $\sigma_1$ : 最大主応力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $\sigma_3$ : 拘束圧 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $\sigma_1 = \sigma_3$ : 等方圧密  
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ : 非排水三軸圧縮強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{fc}, (\sigma_1 - \sigma_3)_{fo}, (\sigma_1 - \sigma_3)_{fR}$ : クリープ, 等方圧密, 繰返し供試体の破壊強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $\sigma_c, \sigma_r$ : クリープ, 繰返し荷重強さ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )  
 $\sigma_c/(\sigma_1 - \sigma_3)_{fo}, \sigma_r/(\sigma_1 - \sigma_3)_{fo}$ : クリープ, 繰返し荷重比  
 $\Delta(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ : 有効応力の増分 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

## 参考文献

- 1) H. B. Seed, R. L. McNeill, J. de Guenin: Increased Resistance to Deformation of Clay Caused by Repeated Loading, Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM2, (May 1958)
- 2) 河上房義・小川正二: くり返し応力を受けた締固めた土の力学的性質, 土木学会論文集第96号, S. 38. 8
- 2) 山内豊聡・羅文鶴: 土の繰返し載荷試験結果の解釈と利用, 第11回土質工学シンポジウム, 1966年
- 4) 小川正二・柴山孝幸・山口晴幸: くり返し応力を受ける飽和粘性土の力学的性質, 第8回土質工学研究発表会, S. 48. 6.
- 5) 西勝・中村潤一・近藤茂: 繰返し荷重を受ける飽和粘性土の硬化および劣化現象について, 第8回土質工学研究発表会, S. 48. 6.
- 6) 鈴木敦巳: 有機質火山灰土の土質工学的性質に及ぼす含有水分の影響, S. 49. 10.
- 7) 土質工学会: 土質試験法
- 8) 鈴木敦巳, 荒牧昭二郎, 北園芳人: 黒ボクの非排水繰返し載荷試験, 土木学会西部支部研究発表会論文集, S. 49. 2.
- 9) Y. Yoshimi: Compression of Partially Saturated Cohesive Soils, Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM4, (July, 1963)