

繰返し応力を受けた土の力学的性質について

東北大学 小 川 正 二

緒 論

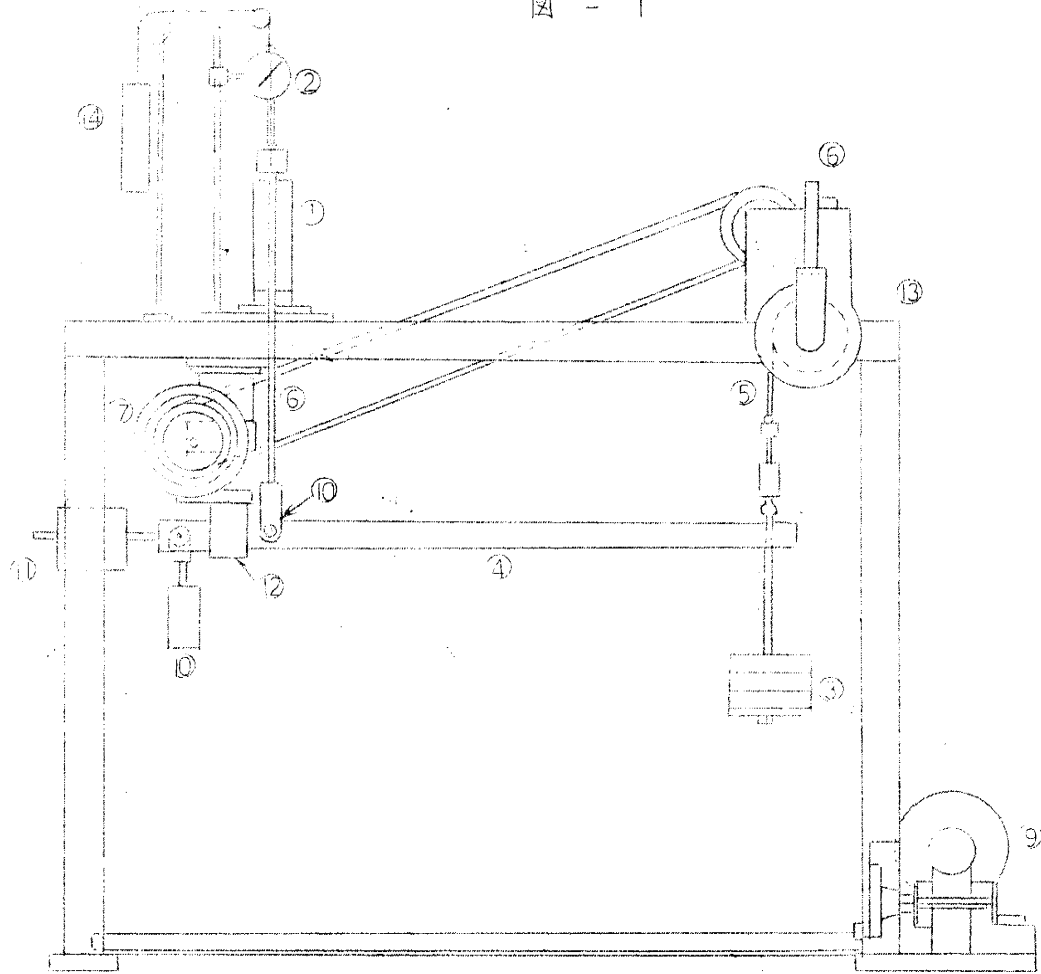
土の力学的性質は土に働く応力の履歴によって異なることは、鋭敏比・事前圧縮などにより我々が大いに経験していることである。特に、滑走路や道路の路盤は、荷重の急速な載荷・除去の繰返しにより、徐々に載荷されたときとは異なる性質になることは容易に想像される。

これら繰返し応力を受けた土の性質についての研究は近年に至り、H. B. Seed や C. K. Chan などによって行われているが、十分ではなく、又、我国に於いてはほとんど行われていない。

以上のことから、繰返し応力を受けた土の力学的性質を調べる為、繰返し応力載荷試験、及び單托圧縮試験を行ない、力学的性質への繰返し応力の大きさ、載荷回数、含水比、密度の影響を調べ、これらの実験結果についてレオロジーの観点より、模型的考察、土の構造による考察を行った。

1) 試 験 機 置

- ① 供 試 体
- ② ダイアルゲージ
- ③ 荷 重
- ④ 桿
- ⑤ ワ イ ヤ ー
- ⑦ ハ ン ド ル
- ⑧ フ レ ー ム
- ⑨ モ ー タ ー
- 減 速 器
- ⑩ ⑪ ⑭ 垂



2) 試料及び供試体

実験に用いた試料は仙台市近郊根白石のもので、自然乾燥し、 20mm フルイでふるって用いた。表 - 1 に土の物理試験の結果を示す。

表 - 1

比重	2.600	塑性指数	41.51%	内部摩擦角	$15^{\circ}31'$
分類	シルト質ローム	最適含水比	29.40%		
塑性限界	26.20%	最大乾燥密度	1.420 g/cm^3		
液性限界	67.71%	粘着力	0.73 kg/cm^2		

上の試料に必要な水を加え任意の含水比とし、24時間以上湿気箱に放置し、ハーバードの締固めタンパーの圧力を種々変えて任意の密度の供試体を作った。この供試体の含水比の变化を防ぐためにパラフィンで覆い一日放置してから実験を行った。なお供試体の直径は5.0cm 高さは22.6cmであり、実験に用いた含水比、密度の関係は表-2に示す。

表 - 2

含水比 %	密度 g/cm^3	含水比 %	密度 g/cm^3
20.18	1.420	27.34	1.456
24.29	1.455	27.19	1.502
21.84	1.451	27.35	1.479
		27.35	1.427

3) 試験方法

繰返し応力載荷試験では単純圧強度の大きさにより載荷応力を種々変え、載荷回数は5000, 10000, 50000, 100000回とし、載荷回数と変位量の関係を調べた。

必要な回数だけ載荷した後、単純圧縮試験を行い、応力-ヒズミ曲線への繰返し応力載荷の影響を調べ、同時に、比較のために繰返し応力を載荷しない供試体についても圧縮試験を行った。

繰返し応力載荷試験に於ける載荷期間は0.56秒、除去期間1.12秒、1サイクル1.68秒であり、単純圧縮試験に於ける載荷速度は $0.18 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ であった。

4) 繰返し応力載荷試験結果

1) 繰返し応力載荷中の永久変位への荷重・含水比・密度の影響

半対数方眼紙の普通目盛に永久変位、対数目盛に載荷回数をプロットすると、低含水比(21.84%)の場合には図-2に示すようになり、永久変位は載荷重の大なるほど大きい。その変位曲線は荷重の如何に拘らず下向型となる。

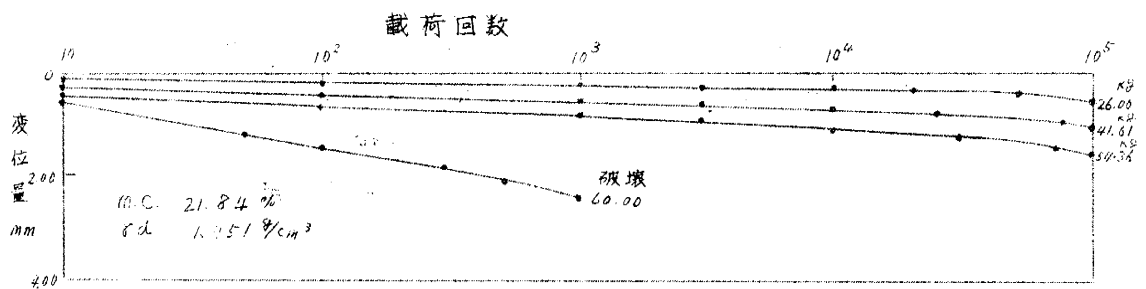


図 - 2

更に、含水比 27.34% になると永久変位曲線は荷重の大きさに関係なく直線的に変化し、載荷重 41.61 kg では変位量 5.00 mm で破壊した。

含水比が 30.18% になると、小さな荷重では下向型、荷重が大きくなるにつれ、直線型から上向型になる。図 - 3 は含水比 30.18% のときの永久変位曲線を示す。

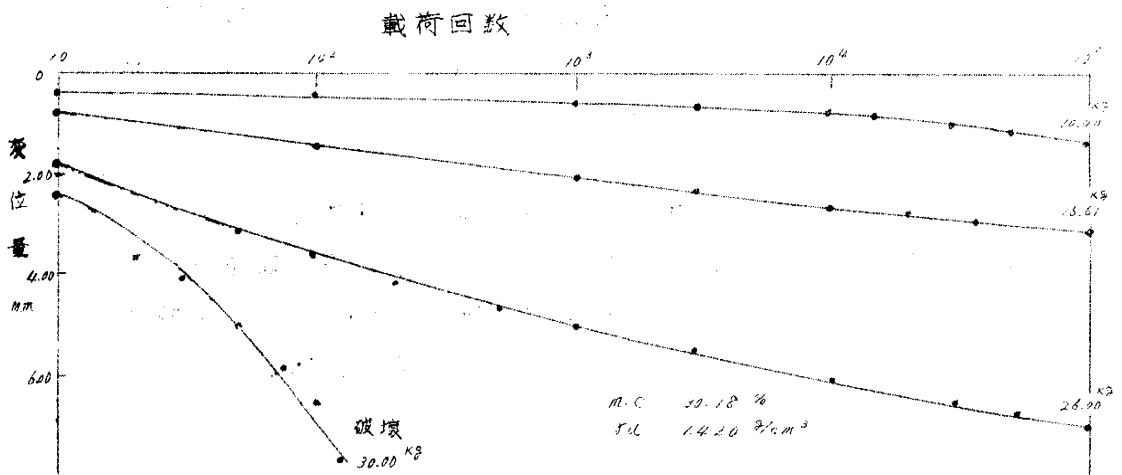


図 - 3

平均含水比 27.31% で密度を変化させた場合にも荷重の大きさにより図 - 3 のような傾向を示している。

次に、密度を一定にし含水比を変えた 4 つの供試体に 26.00 kg の荷重をかけると永久変位曲線は図 - 4 のように塑性限界 (26.20%) を境にしてその型は変わり、しかも変位量は含水比の高いほど

大きい。又、含水比 27.31% で密度を変えた 4 つの供試体に 26.00 kg 荷重をかけると図 - 5 に示すように、密度 1.427 1.502 g/cm^3

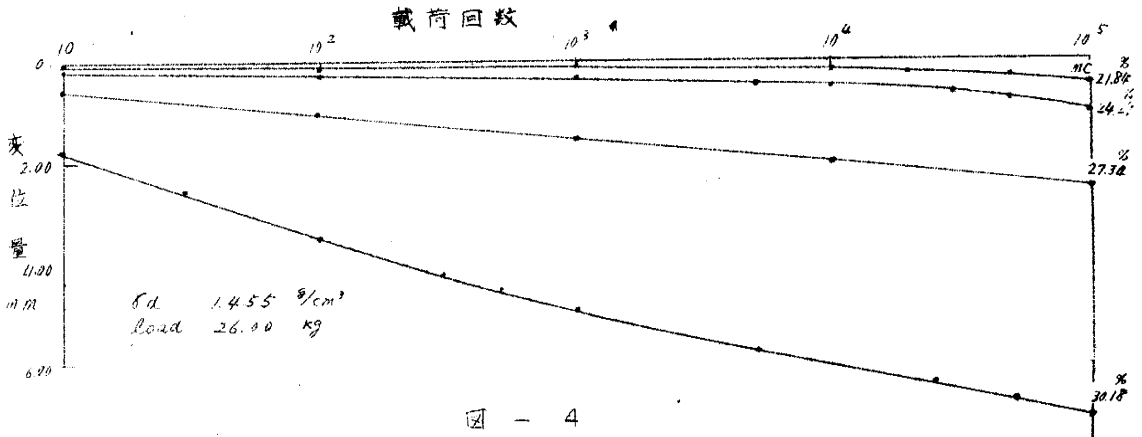


図 - 4

のときに変位量は大きく、密度 1.458 1.479 g/cm^3 のときには他の 2 つより小さくなる。即ち、締固めの過剰、あるいは不足のときに永久変位の大きいことがわかる。

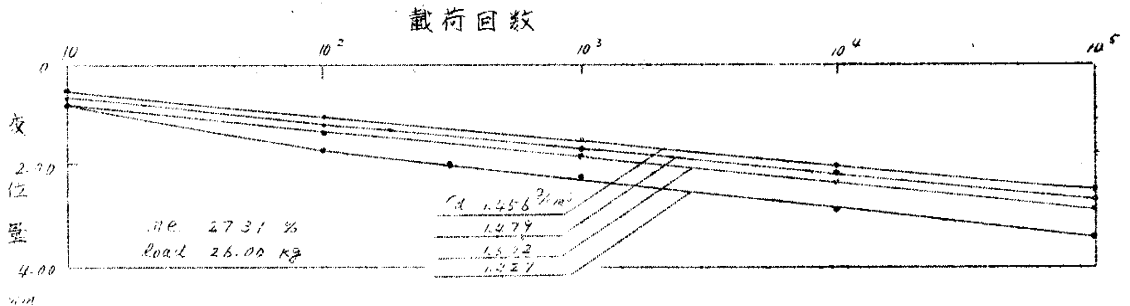


図 - 5

ロ) 弾性変位及び弾性変位率

弾性変位量は図 - 6 のように供試体の状態がいかなる場合にも荷重の大なるほど大きく、10000 ~ 20000 回位から急激に減少する。又含水比の変化よりみると含水比の高いほど弾性変位は大きく、少い載荷回数で急激な減少をしている。一方、密度の変化によつては弾性変位の大きさはほとんど変わらない。

$$\text{今、弾性変位率} = \frac{\text{載荷重} / \text{供試体の面積}}{\text{弾性変位} / \text{供試体の高さ}}$$

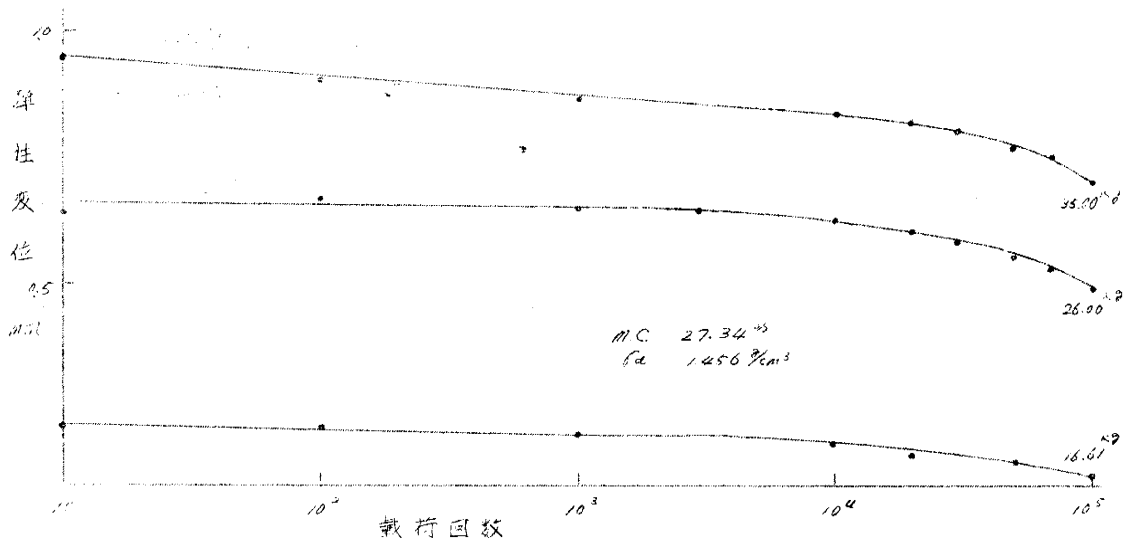


図 - 6

とすると、一般に、弾性変位率は載荷量の小さなほど大きい、一例をあげれば図-7のようになる。又、含水比の低いほど大きく、密度の变化によつてはほとんど差異が認められない。しかも、一般的傾向として載荷回数 $10^4 \sim 2 \times 10^4$ で急激に増加し、

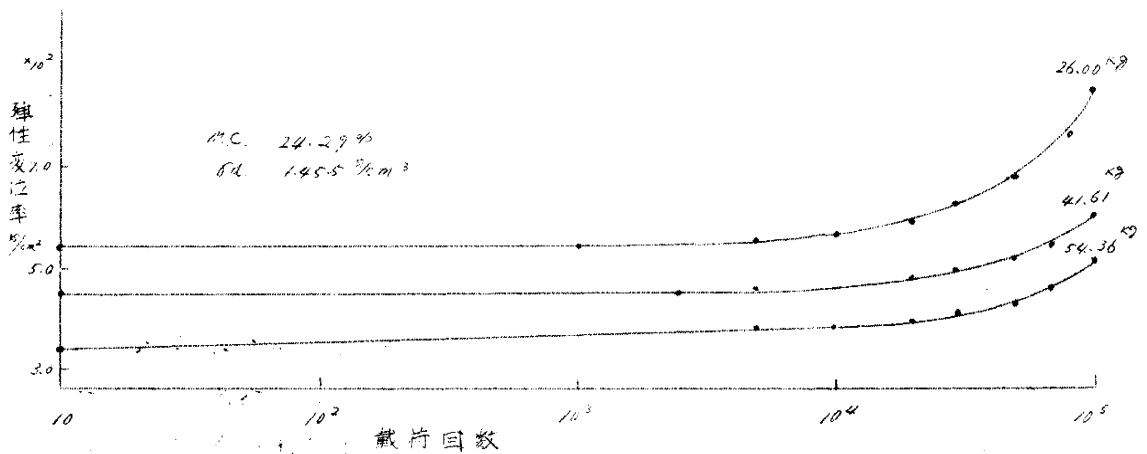


図 - 7

図-8のようにその傾向は低含水比ほど著しい。しかし、いづれにしても弾性変位率のオーダーは 10^2 位であり、繰返し応力載荷後の応力-ヒズミ曲線の初期接線係数より幾分大きい値を

示している。

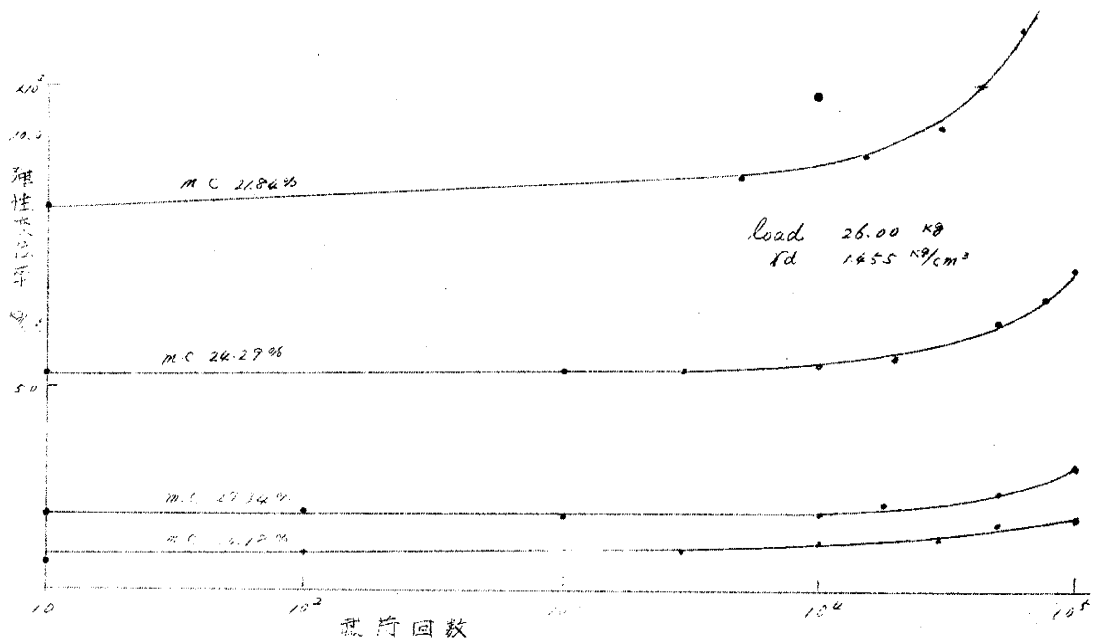


図 - 8

5) 限界応力を求める試み

前述の永久変位量曲線より一定変位を生ずるに要する応力と載荷回数をプロットすると、図-9のようなグラフを種々の条件の供試体について求めることが出来る。このようなグラフより、永久変位量の限界値を定めれば、その変位を生ずる応力の大きさと載荷回数がわかる。

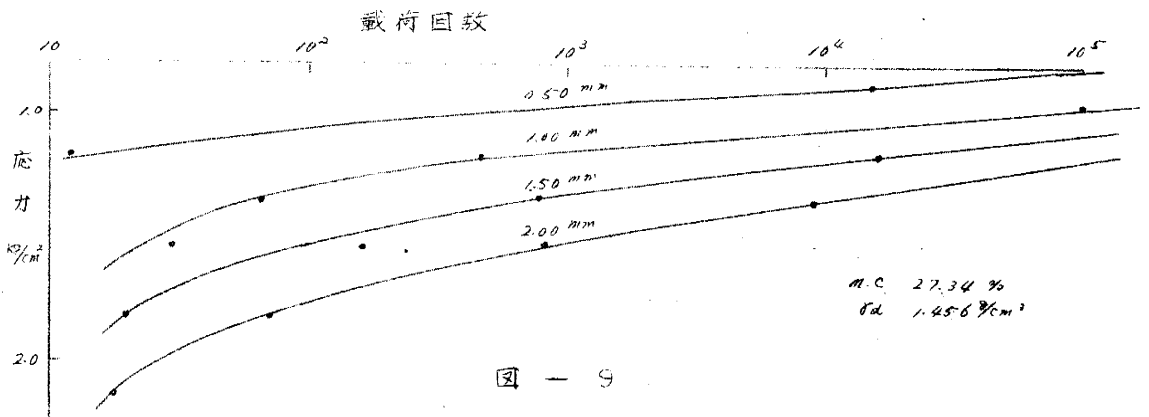


図 - 9

6) 上の力学的模型

物体の力学的性質を定量的に表わすには，その系の運動を示す微分方程式をとけばよい。しかし，土はその性質上，均一物体と考えることは出来ないので，力学的模型を使って力学的性質を定性的に考えてみる。

土の弾性部をバネ，粘性部をダッシュポット，降伏状態をスライダーを用いて表わし，剛性率を r ，粘性率を η ，降伏値を θ とすると，弾性挙動は $p = r\varepsilon$ ，粘性挙動は $p = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$ 降伏が生じたときのスベリの挙動は $(p - \theta) = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$ で表わされる。

土の力学的模型として，フォークト，マックスウェル，塑性流動の模型を組合せて図-10 aの型を仮定する。

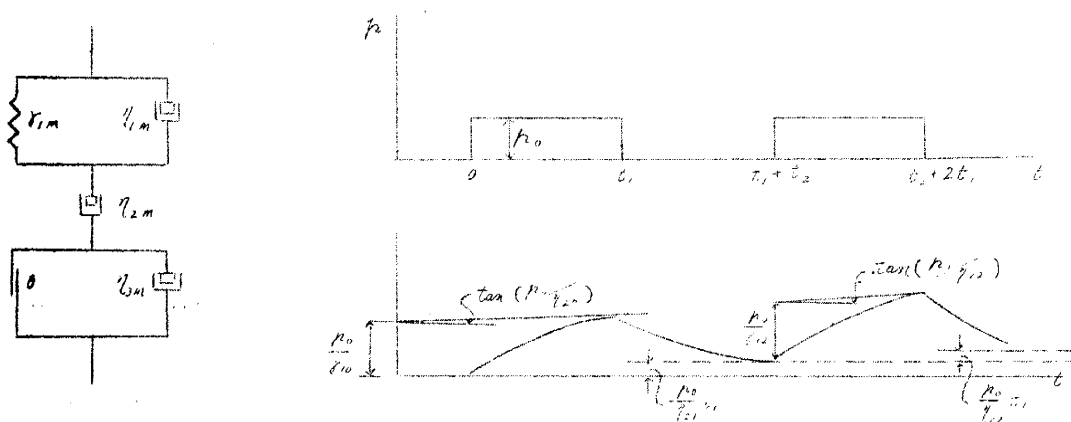


図 - 10

一定荷重 p_0 を載荷したときの変位(ε)は，

$$\varepsilon = \frac{p_0}{r_m} + \left(\varepsilon_0 - \frac{p_0}{r} \right) e^{-\frac{r_m}{\eta_m} t} + \frac{1}{\eta_m} p_0 t + \left\{ \frac{1}{\eta} (p_0 - \theta) t \right\} \quad \text{--- (1)}$$

となり，第一・二項はフォークトの模型，第三項はマックスウェルの模型，第四項は塑性流動の模型によるもので，第四項は p_0 が θ より大きいときのみ作用する。

一回目載荷に於いては $\varepsilon_0 = 0$ とし，(1)式より，

$$\varepsilon_1 = \frac{\rho_0}{\delta_{11}} (1 - e^{-\frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} t}) + \frac{1}{\gamma_{21}} \rho_0 t + \left[\frac{1}{\gamma_{31}} (\rho_0 - \theta) t \right] \dots\dots (2)$$

従つて、最大変位は(2)式に於いて $t = t_1$ を代入した値になり、この値が荷重除去の初期変位 ε_0 になる。故に荷重除去後の変位は

$$\varepsilon_{11} = \frac{\rho_0}{\delta_{11}} (1 - e^{-\frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} t_1}) e^{-\frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} (t - t_1)} + \frac{\rho_0}{\gamma_{21}} t_1 + \left[\frac{1}{\gamma_{31}} (\rho_0 - \theta) t \right] \dots\dots (3)$$

二回目載荷前の変位は

$$\varepsilon_{111} = \frac{\rho_0}{\delta_{11}} (1 - e^{-\frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} t_1}) e^{-\frac{\delta_{11}}{\gamma_{11}} t_2} + \frac{\rho_0}{\gamma_{21}} t_1 + \left[\frac{1}{\gamma_{31}} (\rho_0 - \theta) t \right] \dots\dots (4)$$

従つて、 m 回載荷中の変位は

$$\begin{aligned} \varepsilon_m = & \frac{\rho_0}{\delta_{1m}} + \left(\varepsilon_{mmmm-1} - \frac{\rho_0}{\delta_{1m}} \right) e^{-\frac{\delta_{1m}}{\gamma_{1m}} (t - \overline{m-1} \overline{t_2 + t_1})} + \frac{\rho_0}{\gamma_{2m}} (t - \overline{m-1} \overline{t_2 + t_1}) \\ & + \sum_{n=1}^{m-1} \frac{\rho_0}{\gamma_{2n}} t + \left[\frac{1}{\gamma_{3m}} (\rho_0 - \theta) (t - \overline{m-1} \overline{t_2 + t_1}) + \sum_{n=1}^{m-1} \frac{1}{\gamma_{3n}} (\rho_0 - \theta) t_1 \right] \dots\dots (5) \end{aligned}$$

又 m 回目の荷重除去中の変位は

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11m} = & \left\{ \frac{\rho_0}{\delta_{1m}} + \left(\varepsilon_{mmmm-1} - \frac{\rho_0}{\delta_{1m}} \right) e^{-\frac{\delta_{1m}}{\gamma_{1m}} t_1} \right\} e^{-\frac{\delta_{1m}}{\gamma_{1m}} (t - \overline{m-1} \overline{t_2 + t_1})} \\ & + \sum_{n=1}^m \frac{\rho_0}{\gamma_{2n}} t_1 + \left[\sum_{n=1}^m \frac{1}{\gamma_{3n}} (\rho_0 - \theta) t_1 \right] \dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここに

$$\varepsilon_{mmmm-1} = \left\{ \frac{\rho_0}{\delta_{1m-1}} + \left(\varepsilon_{mmmm-2} - \frac{\rho_0}{\delta_{1m-1}} \right) e^{-\frac{\delta_{1m-1}}{\gamma_{1m-1}} t_1} \right\} e^{-\frac{\delta_{1m-1}}{\gamma_{1m-1}} t_2}$$

である。

m 回目載荷時の最大変位は(5)式に於いて、 $t = \overline{m-1} \overline{t_2 + t_1} + t_1$ を代入した値で(7)とし、荷重除去後の最小変位は(6)式に $t = m(t_2 + t_1)$ を代入した値で(8)とすると弾性変位は(7)-(8)、弾性変位率は

$$\frac{\rho_0}{(7)-(8)} \frac{S}{R} \quad \text{と表わされる。}$$

上の模型に於いて

$$\delta_{11} < \delta_{12} < \dots\dots < \delta_{1m}$$

$$\gamma_{11} < \gamma_{12} < \dots\dots < \gamma_{1m}$$

$$\gamma_{21} < \gamma_{22} < \dots\dots < \gamma_{2m}$$

$$\eta_{11} < \eta_{12} < \dots < \eta_{nn}$$

とすれば繰返し応力載荷試験の結果と定性的にはかなりよく一致する。

7) 土の構造

土の力学的性質に影響する構造上の要因はコロイド粒子の間隔及び配列、*micelle* の径、*clay matrix* が大きなものである。

以上、繰返し応力を受けた土の永久変位、弾性変、弾性変位率についてのみ述べた。