

九州大学工学部 正員 山内豊聡

同 大学院 学生員 青砥 宏

1. まえがき

道路盛土等の断面設計に当りては、従来主として弾性理論が用いられてきた。しかし土構造物において弾性と称しているものは、鋼材等における *spring-back* に相当するものと思われる。また、通常塑性と称しているなかにも、すべり、塑性流動、圧縮性、圧密等の多くの要素があると考えられる。この様な土構造物が繰返し応力を受ける場合、その塑性的性質が土構造物に影響をおよぼす割合は弾性的物体の比ではない。たとえば、自動車道の路床路体部の沈下などは塑性的沈下量の累積によるところが大きいと思われる。

本論文は、主として道路盛土のような繰返し応力を受ける土構造物の塑性的挙動に関する実験的研究である。また、従来いろいろの方法により、将来の沈下量を推定する事が試みられてきたが、本論文では別の角度から沈下量の推定を試み、さらに破壊における繰返し載荷回数(寿命)を推定しようとするものである。

2. 試料ならびに実験方法

試料としては、花崗岩の風化残留土であるクセ土(福岡市近郊金山産)、乱さないシラスおよび乱したシラス(鹿児島県国分市産)、その他、焼ボタ、生ボタ、黒ボク、ソイルセメント、ソイルスファルト等の各試料を用いた。特にクセ土は日本全国に広く分布すると思われるので、クセ土を中心に実験データを取りまとめた。クセ土とシラスに限ってその物理的性質を表-1に示した。

実験装置は九大式全自動繰返し三軸圧縮試験装置、ならびにコンクリート製繰返し載荷用試験槽を用いた。前者は液圧を一定に保ち、空気圧駆動式圧カシリンダによる三軸圧を繰返し載荷するものである。また、後者は1.4m x 1.4mの断面を持つ深さ1mの試験槽に盛土断面を打設し、直径20cmの剛性載荷版で繰返し載荷を行なうものである。載荷条件については、前者に限って表-2に示す。

3. 実験結果とその考察

前述のよな試料および試験装置を用い、10万回程度の繰返し載荷試験を行ない、図-1(a),(b)に示すような結果を得た。今まで全沈下量は繰返し載荷回数の対数に比例して増加する傾向にあると言われていたが、かならずしも正しいとはいえない。たとえば、載荷回数の対数に対する全沈下量増加曲線がある一定値に収束する場合にはその直線性はよく失われる。そこで著者らは、塑

表-1 試料の物理的性質

土の種類	マサ土	シラス
土粒子の比重	2.64	2.46
液性限界(%)	測定不能	測定不能
塑性指数(%)	N.P.	N.P.
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.74	1.38
最適含水比(%)	15.0	24.0
三角標による分類	砂質D-U	砂質D-U

表-2 載荷条件および供試体形状

土の種類	マサ土	シラス
荷重形状	台形荷重	台形荷重
載荷(物)除荷(物)	3.1-0.9	1.0-1.0
供試体高さ(cm)	8.15~8.25	8.15~8.25
供試体直径(cm)	3.50	3.50
載荷方法	側圧一定	側圧一定

性沈下量の全沈下量に対する百分率 (δ_p / δ_t , 以後 γ と書く) が載荷回数に対数に対してどのように変化するかを調べた。図-2が $\gamma - \log n$ の関係を示す図である。ここに γ は土供試体の構造状態を表わす1つの要素であると思われる。 $\gamma - \log n$ 図より次の事がわかった。

- 1) γ と $\log n$ の間には著しい直線関係が存在するようである。
- 2) この直線の傾きは、試料の物理的性、供試体の状態(飽和上、間げき比)、荷重強度、載荷条件などによって決定される量であると思われる。
- 3) 繰返し応力を受ける土供試体における弾性沈下量 δ_e の変化は、塑性沈下量 δ_p の累積に比べて無視出来る程小さい。

4) 繰返し載荷回数 n が小さい領域 ($1 \sim 10$) では、 γ の値は $\gamma - \log n$ の直線関係から少しはげられるようである。つまり繰返し載荷回数 n が小さい領域では、土供試体は繰返し応力を十分受けた後とは異なった挙動を示すものと考えられる。

5) 同一の試料においては、供試体の状態(飽和度、間げき比)、荷重強度、載荷周期にはほとんど関係なく、ある一定の γ の値において破壊すると思われる。破壊点とは、 $\gamma - \log n$ 直線から γ の値はげれ始める点をさすものとする。

6) 多くの異なる試料に、(破壊点における γ の値を調べると、乱さないシラスおよび乱したシラスにおいては $\gamma = 90\%$ 、マサ土においては $\gamma = 85\%$ などであり、土供試体では $75\% \sim 90\%$ の値をとると思われる。

7) 1回荷重における弾性沈下量が小さい供試体が常に強いとは断定出来ない。また、1回荷重における全沈下量が小さい供試体が常に強いとも断定出来ない。土供試体の繰返し応力に対する強さは、 $\gamma - \log n$ 直線の傾きおよび1回荷重における γ の値によって決まるとと思われる。

※ 本研究においては主として締め固め不飽和土を取り扱ったもので、飽和土に関してはこれを除くものとする。

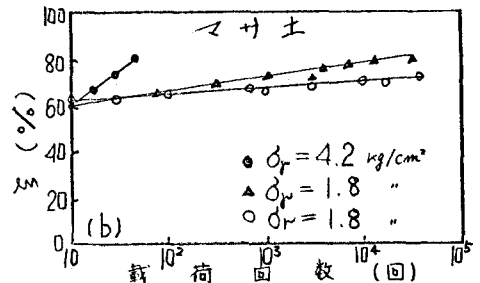
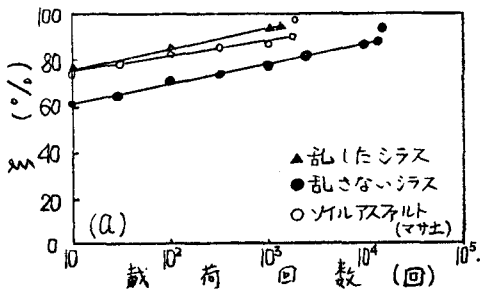
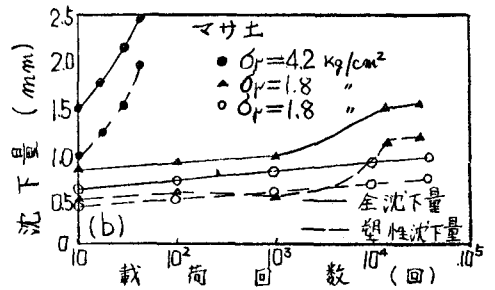
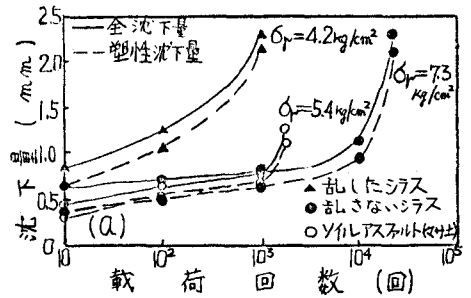


図-2 繰返し載荷回数と γ の関係

4. 実験式

以上の実験結果から次のような実験式を仮定した。ただし ξ_n : 載荷回数 n における弓の値, τ : 考え始める時の弓の値, n : 繰返し載荷回数, n_0 : 考え始める時の載荷回数とする。弓 - $\log n$ 直線の傾きを

$$\tan \theta = \frac{\xi_n - \tau}{\log(n/n_0)} \quad (1)$$

で表わすものとすれば、任意の載荷回数 n における弓の値は次式で求められる。

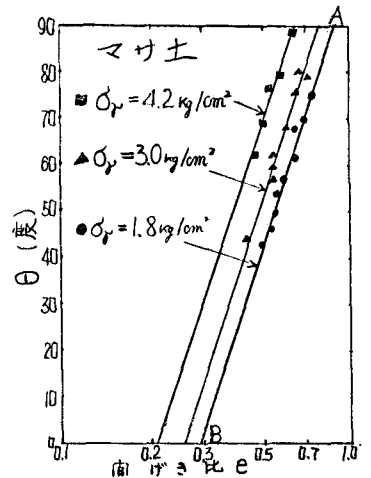
$$\xi_n = \{\log(n/n_0)\} \cdot \tan \theta + \tau \quad (2)$$

(2) 式によ、(任意の載荷回数 n における弓の値を求める際に $\tan \theta$ の値が問題となる。次に $\tan \theta$ について述べる。今、 P : 荷重強度 (kg/cm^2), a : 供試体の状態 (飽和度, 間げき比など) によ、(定まる量, e : 載荷条件によ、定まる量とする。 $\tan \theta$ が次式によ、(定まると仮定する。

$$\tan \theta = f(P, a, e) \quad (3)$$

e は各土構造物に関し (統計的に定めることができると考えられるので) 一定に保つた。 a に関しては、飽和に一定に保つことは困難であるので含水比を 10% に保ち荷重強度 P , 間げき比 e を変化させ (三軸繰返し圧縮試験を行ない例 - 3 のような結果を得た。試料はくけ土である。

図 - 3 は、縦軸に (1) 式における θ をとり、横軸に初期間げき比 e の対数をとり、表示したものである。この図において $\log e$ と θ の関係は直線によ、(近似できるといえる。図 - 3 において点 A と点 B が定まれば、 $\theta - \log e$ 図より任意の間げき比、および荷重強度に対する θ の値が定まる。さて、ここで $\theta = 90^\circ$ ($\tan \theta = \infty$) という境界に、よく考えてみよう。この点の近傍では、ある荷重強度 P に対し (載荷回数 n が少ない範囲 ($n = 1 \sim 2$) で弓の値が 100% に限りなく近づくはざである。この意味から、 $\theta = 90^\circ$ は $\tau = 100\%$ に対応するものと思われる。厳密に言えば、 $\theta = 90^\circ$ も $\tau = 100\%$ も存在しない。すなわち境界は省かれるべきである。以上より A 点は、考える荷重強度 P に対し ($n = 1 \sim 2$)



で破壊する最小間げき比を表わしている。ゆえに、A 点は実験的に求めることが可能である。同様に $\theta = 0^\circ$ と $\tau = 0\%$ の対応も考えられるはずである。つまり、 $\theta = 0^\circ$ で $\tau = 0\%$ であるような性質は完全弾性のはざである。このような意味から、 $\theta - \log e$ 直線が $\log e$ 軸を切る点を求めるのはかなり困難なはずである。しかし、飽和度を一定に保つた一連の試験を行ない e と e_0 の関係から B 点を求めることはできるのはないだろうか。また、 $\tan \theta$ の値を求めるに当り、(従来行なわれているように $n = 1 \sim 20$ 回の載荷を行な、(決定することも可能である。

5. 沈下量の推定に関する試み

5-1 第 n 回目目の全沈下量の推定

今、ある土供試体に任意の荷重強度 P が n 回繰返し載荷されたとし、その時の全沈下量 δ_{tn} を求

めてみよう。ただし、 $\tan \theta$, τ , δ_{pn} , δ_{ei} , はすでに求められたとする。載荷回数 n ではまだ破壊していないものとする。

第 n 回における ξ の値は (2) 式より $\xi_n = \{\log(n/n_0)\} \cdot \tan \theta + \tau$ (求められる。

また、定義より $\xi_n = \delta_{pn} / \delta_{en} = \delta_{pn} / (\delta_{pn} + \delta_{en})$ (4)

先に述べたように、弾性沈下量の載荷回数 n に対する変化は塑性沈下量の累積に比して非常に小さいので、 $\delta_{en} = \delta_{ei}$ とすると、 $\xi_n = \delta_{pn} / (\delta_{pn} + \delta_{ei})$ (4)'

(4)' を変形すると

$$\delta_{pn} = \xi_n \cdot \frac{\delta_{ei}}{1 - \xi_n} \quad (5)$$

ゆえに、第 n 回目の全沈下量 δ_{tn} は (6) 式で求められる。

$$\begin{aligned} \delta_{tn} &= \delta_{pn} + \delta_{ei} = \xi_n \cdot \frac{\delta_{ei}}{1 - \xi_n} + \delta_{ei} = \delta_{ei} \cdot \frac{1}{1 - \xi_n} \\ &= \frac{\delta_{ei}}{1 - [\{\log(n/n_0)\} \cdot \tan \theta + \tau]} \quad (6) \end{aligned}$$

5-2 寿命の推定

$\xi - \log n$ 直線において、ある載荷回数における ξ の値が直線から上方にはずれ始める点がある。その点を破壊点と呼ぶこと、および破壊点までの ξ の値はほぼ一定であることは先に述べたとおりである。そして破壊点を結んだものを限界線とする。(また、 ξ を塑性変形率と呼ぶ)

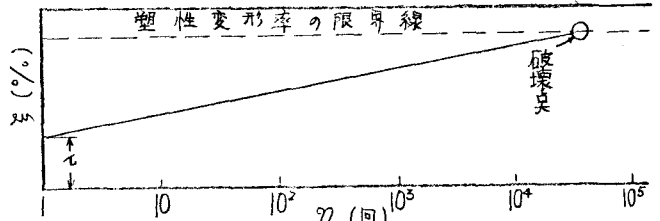


図-4 ξ と $\log n$ の関係 (略図)

ある土供試体に荷重強度 P を繰返し載荷する場合、 $\tan \theta$, τ , がわか、(いる場合には図-4 のようにしてそ

の寿命が推定出来る。また、先に述べたように、破壊点における ξ の値は荷重強度、供試体の状態、載荷周期、にはほとんど影響されないようである。

6. あとがき

本論文において著者らは、繰返し応力を受ける土の変形を考えるにあたり、土供試体の構造状態を表わす無次元量 ξ を用いた。そして ξ による、(将来の沈下量の推定ならぬ) 寿命の推定を試みたが、 $\xi - \log n$ 図において、土供試体の硬化現象による強さの増加ならぬ異なる、荷重強度を繰返し受ける場合の土の挙動などを考えたうえでの寿命の推定も可能(と思われる。また従来、弾性係数、CBR 値、 K 値、などによる強さを論じていたが、繰返し応力を受ける土構造物の場合、これらとあわせて $\tan \theta$ の値も考慮すべきであろう。すなわち、土構造物にと、くは $\tan \theta$ は小さいければ小さい程よい。同様に τ も考慮すべきである。

今回は主としてくせ土などの砂質ロームを試料として用い、締め固め飽和土にノック述べたが、ヘドロなどの粘性土(排水の場合は圧密を伴う)の場合にノック述べた通りではない。