

繰返し三軸荷重を受ける土の変形係数の求め方について

九州大学工学部助教授 山 内 豊 聰
同 大学院学生 ○ 羅 文 鴻

1. ま え が き

支持用土構造物の多くは繰返し荷重を受けるものであるが、従来の設計においてこのような要素はあまり取入れられていなかったといえる。土のいくつかの力学的要素のうち、変形係数は土の強度特性を示すものとして重要なものであるが、一般には静荷重方式で求められている。土構造物の設計をより合理的にするために、筆者は締め固め土供試体に繰返し三軸荷重を与え、繰返し荷重を受ける土の変形係数の求め方を考察し、さらに統計的取扱いをした結果が、実験結果とよく一致することを示した。

2. 統計的取扱いによる荷重強度とヒズミの関係

繰返し荷重を受ける土の荷重強度と変形の関係は、Freudenthal¹⁾の材料の破壊に対する統計的理論による考え方で、つぎのように説明される。

いま周期を一定として繰返し荷重強度 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ その順序で連続的に土供試体に加えるものとする。各荷重強度はいつれも互いに独立したものとする。 σ_N の荷重強度の段階における供試体の全ヒズミを ϵ_N とし、荷重強度 σ_N によつて生じた全ヒズミ ϵ_{N-1} から全ヒズミ ϵ_N までの全ヒズミの増加分 $\epsilon_N - \epsilon_{N-1}$ は σ_N と ϵ_N の函数 $f(\epsilon_N)$ の積であると仮定する。 $f(\epsilon_N)$ はヒズミ発生履歴過程を表わす。すなわち

$$(\epsilon_N - \epsilon_{N-1}) = \sigma_N f(\epsilon_N) \quad (1)$$

$$\therefore (\epsilon_N - \epsilon_{N-1}) / f(\epsilon_N) = \sigma_N \quad (2)$$

荷重強度 σ_1 から同じく σ_N までの総和はつぎのようになる。

$$\sum_1^N \sigma_k = \sum_1^N \frac{\epsilon_N - \epsilon_{N-1}}{f(\epsilon_N)} \quad (3)$$

全ヒズミ ϵ は連続的に変化する(で、(3)式はつぎのように表わされる。

$$\sum_1^N \sigma_k = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \frac{d\epsilon}{f(\epsilon)} \quad (4)$$

各繰返し回数 N における全ヒズミ ϵ_N は、その1回分だけ少ない繰返し回数 $N-1$ における土供試体内部の構造破壊が大きいほど大きいから、近似的に ϵ_N は ϵ_{N-1} に比例すると仮定できる。したがつて

$$f(\epsilon) = \frac{1}{C} \epsilon$$

とおくことができる。 C は比例定数である。ゆえに(4)式はつぎのようになる。

$$\sum_1^N \sigma_k = C \times \int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \frac{d\epsilon}{\epsilon} = C \times \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) \quad (5)$$

繰返し荷重強度 $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_N$ であるので(5)式の左辺は

$$\sum_1^N \sigma_k = N \sigma$$

になる。したがつて(5)式は

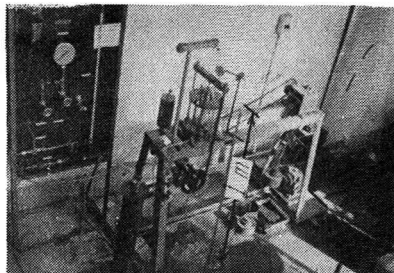


写真 1

$$N\sigma = C \log_{10}(\varepsilon/\varepsilon_0) \quad (6)$$

になるから、結局つぎのようになる。

$$\frac{\sigma}{\log_{10}(\varepsilon/\varepsilon_0)} = \frac{C}{N} = K_N \quad (6')$$

(6')式から繰返し載荷回数 N をパラメータにした場合の繰返し荷重強度 σ と全ヒズミ ε の対数値との間には近似的に直線関係があることがわかる。すなわち、半対数紙上で算術目盛の荷重強度と対数目盛の全ヒズミの間は直線になるべきである。

3. 実験装置

実験に使用した装置は、さきに筆者²⁾が使用した一軸繰返し載荷試験機を、三軸繰返し載荷ができるように改良したものである(写真-1)。側圧は 2kg/cm^2 まで軸差繰返し荷重は 00kg 前後まであたえることができる。

4. 実験方法

実験に使用した供試体の試料の物理的性質は、

三角座標法による分類	砂質粘土ローム
有効粒径	0.001 mm
均等係数	120
土粒子の比重	2.72
液性限界	55.5 %
塑性指数	19.3 %
最適含水比	24.2 %

この土によつて静荷重方式により、長さ 80 cm 、径 35 cm 、含水比 19% 、乾燥密度 1.552 g/cm^3 の供試体をつくり、これらの土供試体に対して側圧 1.5 kg/cm^2 のもとでそれぞれ異なつた軸差荷重強度を毎回 2 秒の周期で 6000 回づつ繰返しかけた。この結果、それぞれの軸差荷重強度に対する全ヒズミ ε と繰返し載荷回数の対数の間には図-1に示すような関係が得られた。図-1からつぎのことがわかる。約 4.9 kg/cm^2 以下の軸差荷重強度では、全ヒズミは最大繰返し載荷回数 6000 回までわずかながら連続的に増加する。しかし約 4.9 kg/cm^2 より軸差破壊荷重強度までの間の荷重強度では、全ヒズミは 100 回 $\sim$ 200 回で最大値に達し、その後は 6000 回まで巨視的な全ヒズミは生じていない。なお荷重強度が大きいほど全ヒズミが最大値に達するのが早い。これは前者は 6000 回に至つても塑性材料における加工硬化に似た硬化現象が依然として進行中であり、後者はそのような硬化作用が飽和点に達していることの結果を示すものと思われる。この現象は以下に述べる図-2において $N=100, 1000$ 、および 6000 の曲線の間隔が変曲点Ⅲ以後急激に減少することから

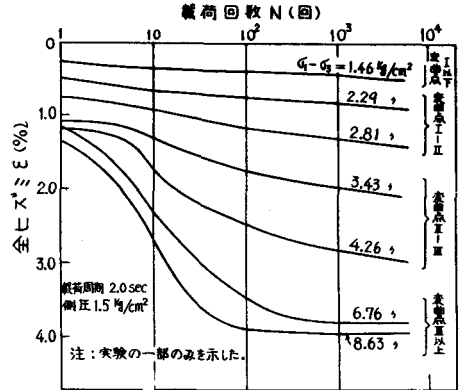


図-1 軸差荷重強度に対するヒズミ・載荷回数との関係

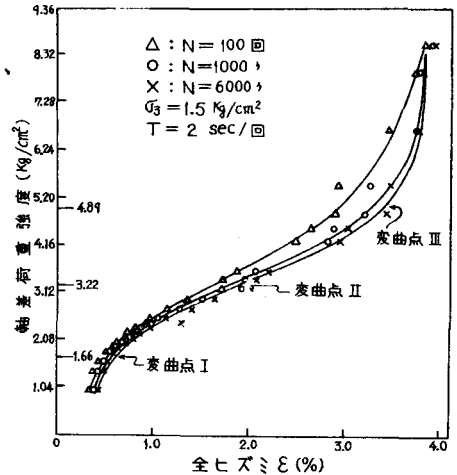


図-2 載荷回数に対する軸差荷重強度・ヒズミとの関係

もわかる。図-1に基づき、繰返し荷重回数 N をパラメータにして繰返し荷重強度と全ヒズミの関係曲線を描くと図-2のようになる。なお全ヒズミを対数にとると図-2は図-3に示すように変わり、それぞれの変曲点の間でほぼ直線的になり、つぎの関係式が得られる。

$$\sigma_{T-I} = a + b \log E \quad (7)$$

$$\sigma_{T-II} = c + d \log E \quad (8)$$

a 、 b 、 c および d はそれぞれ定数であり、(7)式および(8)式は(6)式に示すものと一致している。したがって土がその寿命内に受ける荷重強度の予想される繰返し回数に対するこれらの定数がわかれば、それぞれの荷重強度に対する土の変形係数を求めることができる。 σ - ϵ 曲線からも直接求めることができる。したがって図-2あるいは図-3から、繰返し三軸荷重を受ける土の変形係数を求めることができる。

5. 図-2および図-3に対する考察

図-2においてⅠ、ⅡならびにⅢの変曲点が現われ、それぞれ図-3におけるⅠ'、Ⅱ'およびⅢ'の各点に相当する。これらの変曲点はそれぞれつぎの意義を持つものと考えられる。

(1) 土供試体は側圧を受けるとその結果、圧縮強度は一軸の場合より増大する。変曲点Ⅰ以下の荷重強度ではその大きさが、側圧による抵抗に比べて小さいため、顕著なヒズミ増加は見られない。

(2) 変曲点Ⅰ以上の軸差荷重強度は、側圧による抵抗に比べて大きくなり、全ヒズミは大きく増大している。これは硬化作用が進行中であることを示し、変曲点Ⅲから全ヒズミ増加の割合は減少する。この変曲点Ⅲは一種の降伏点を意味するものと思われる。

(3) 変曲点Ⅲにおいて、土はすでに硬化作用がほとんど限度に達し(図-1)、したがって全ヒズミは巨視的な増大を示さず、荷重強度が土供試体の破壊強度に達すると突然破壊する。これは脆性破壊であり危険である。変曲点Ⅲ以上の荷重強度では、土供試体の内部では微視的破壊を起し始めていると思われるが、外観上は依然としてある程度の形が起きているのみである。これは側圧効果によるものである。

以上のことから、土の設計寿命内において受ける荷重の繰返し回数 N を予想すれば、この場合の変形係数は、繰返し荷重強度または全ヒズミに対応させて求めることができない。この場合、変曲点Ⅲに示す荷重強度を許容荷重強度とするべきであり、変形係数は変曲点ⅠよりⅢまでの間に示す曲線より求めるべきであろう。

6. 静荷重による変形係数と繰返し荷重による変形係数の比較

静荷重による荷重強度とヒズミの関係曲線は図-4に示すようになる。図-1に示すものを破線で同図内に示す。図より明らかなように、繰返し荷重による場合、許容軸

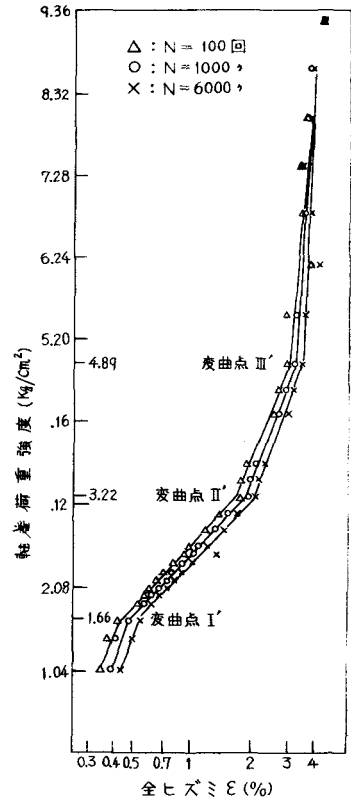


図-3 載荷回数に対する軸差荷重強度・ヒズミの関係

差荷重強度 4.89 kg/cm^2 ($N = 6000$ 回) におけるヒズミ量は 3.4% であるのに対して、静荷重の場合、同荷重強度に対するヒズミ量は 8.1% にも及ぶ。したがって前者の軸差荷重強度 4.89 kg/cm^2 、 $N = 6000$ 回に対する変形係数 $C_r = 4.9 / 0.034 = 144 \text{ (kg/cm}^2)$ であり、後者の変形係数 $C_s = 4.9 / 0.081 = 60 \text{ (kg/cm}^2)$ である。したがって $C_r / C_s = 2.4$ となり、繰返し荷重を受ける土の変形係数は 6000 回の繰返し回数に対する最大安全荷重は静荷重を受けるものの 2.4 倍になることがわかる。このように繰返し荷重を受ける土の安全係数は静荷重方式によるものより小さくしてもよいと考える。軸差荷重強度 4.9 kg/cm^2 以下の荷重強度でも C_r は C_s より大きいことがわかる。また変曲点Ⅱからはその増大の割合は増すようである。

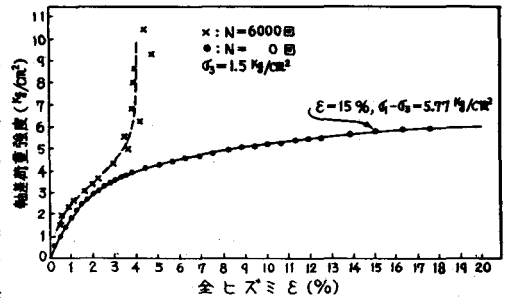


図-4 静荷重方式による荷重強度とヒズミの関係

7. 結論

- (1) 統計学的取扱いに基づいた結果は、実験結果とよく一致することがわかった。すなわち、(7)および(8)両式において、定数 $A=0$ 、 $C=0$ とおけば(6)式と一致し、(7)および(8)両式は(6)式の一般式ともいえる。
- (2) 土の変形係数を求めるのに使われる $\sigma \cdot \epsilon$ 曲線は、繰返し荷重を受けるものに関して、3個の変曲点を生じ、それぞれにおいて述べたような意味をもつ。
- (3) 繰返し荷重を受ける土は、変曲点Ⅲ以後より荷重強度を増しても巨視的なヒズミは生じないが、実際には土はすでに硬化作用が限度に達しており、容易に脆性破壊を起す危険があるので、この場合土は変曲点Ⅲに相当する荷重強度をもつて、許容荷重強度または繰返し荷重を受ける土の三軸圧縮強度とすべきである。したがって、変形係数は変曲点Ⅲ以下について求めるべきである。
- (4) 繰返し荷重を受ける土の変形係数は、静荷重を受ける場合のそれに対して2倍以上もの値を示している。この値は安全係数的意味があるものと考えられる。

引用文献

- 1) A. M. Freudenthal: A S T M Special Tech. Publ. No. 121, 1952 Mar.
- 2) 山内豊聰, 羅文鶴: 繰返し荷重を受ける土の変形に関する一法則, 九大工学集報, Vol. 37, No. 1, 昭 39. 3.