

氏 名 ( 本 籍 )	小 川 正 二 ( 栃 木 県 )
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 8 1 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 1 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 土 木 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	繰 返 し 応 力 を 受 け る 土 の 強 度 と 変 形 に 関 する 研 究

( 主 査 )

論 文 審 査 委 員	教 授 河 上 房 雄	教 授 樋 浦 大 三
	教 授 多 谷 虎 男	教 授 後 藤 幸 正

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

最近の交通量の激増、あるいは交通車両の重量化や高速化に耐えうる路床や路盤を合理的に設計するには、土の動力学的性質を知らなければならないが、現在までに行われているこのように土の性質に関する研究は少ない。

著者はこのように見地から、締固めた不飽和土に種々の大きさの応力をくり返して載荷し、載荷回数および供試体の性質を変化させて、土の動力学的性質に関する実験的研究を行った。

従来、くり返し応力を受ける土の変形に関する研究は G. D. Tshebotarioff などによって行われているが、動的な荷重を受ける路床や路盤を対象としたものは H. B. Seed ら、あるいは G. D. Grainger などが行ったものがあるにすぎず、これらの研究も主にくり返し応力の

載荷方法の影響について行ったものであり、土の動力学的性質を十分に表わしているとは言いがたい。

## 第2章 土の構造と間ゲキ圧

土は固体の土粒子とその間ゲキを満す液体と空気からなり、その力学的性質は外力の載荷法、あるいは供試体の内部的性質によつて異なる。このような土の力学的性質におよぼす内部的要因は土粒子の配列構造、粒子間に働く Van der Waals - London の吸引力、Gouy - Chapman の反撥力などの電気的を力あるいは外力によつて生じる間ゲキ圧である。

### 第3章 拘束応力を受けない供試体にくり返し応力を載荷したときの変形

実験には、シルト質ローム、粘土および粘土と砂の混合土3種類、合計5種類の試料を用いた。その物理的性質は第3.1のとおりである。

表-3.1 試料の物理的性質

試料		$W_p$	$W_L$	標準締固めによる最適含水比	標準締固めによる最大乾燥密度	
種類	記号	%	%	%	$g/cm^2$	
シルト質ローム	A	26	68	29.4	1.42	
粘土	B	31	72	32.8	1.38	
粘土 砂質粘土ローム 砂質粘土ローム	粘土と砂の混合比					
	4 : 1	C	27	54	27.8	1.45
	2 : 1	D	23	32	25.5	1.48
	1 : 1	E	19	25	20.5	1.63

供試体はこれらの試料を必要な含水比に調整した後、円筒形の型枠で締固めた。くり返し応力の大きさは供試体の圧縮強さに応じて変化させ、載荷回数は最高  $10^5$  回とした。

くり返し応力を受ける土の変形は塑性変形と弾性変形からなり、塑性変形はくり返し応力度 ( $\sigma_r$ ) が大きく、載荷回数少ないほど大きいが、載荷回数が増すと急激に減少する。(図-3.1)。一方、弾性変位係数 ( $E_r$ ) (くり返し応力度と弾性ひずみの比) は載荷回数が、 $10^3 \sim 10^4$  回までは変化しないが、それ以上載荷すると次第に増加する(図-3.2)。また、その大きさはくり返し応力度が小さい場合、あるいは供試体の含水比が低いか、砂含有量

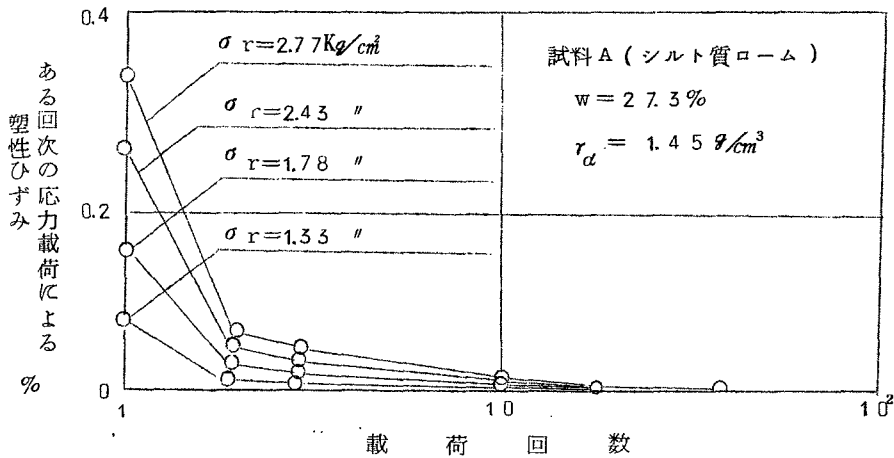


図-3.1 ある回次のくり返し応力載荷による塑性ひずみと載荷回数との関係  
 の多い場合ほど大きく、くり返し応力を受けない最適含水比の状態にある供試体では、  
 $E_r = 100 \sim 600 \text{ Kg/cm}^2$  と考えられる。

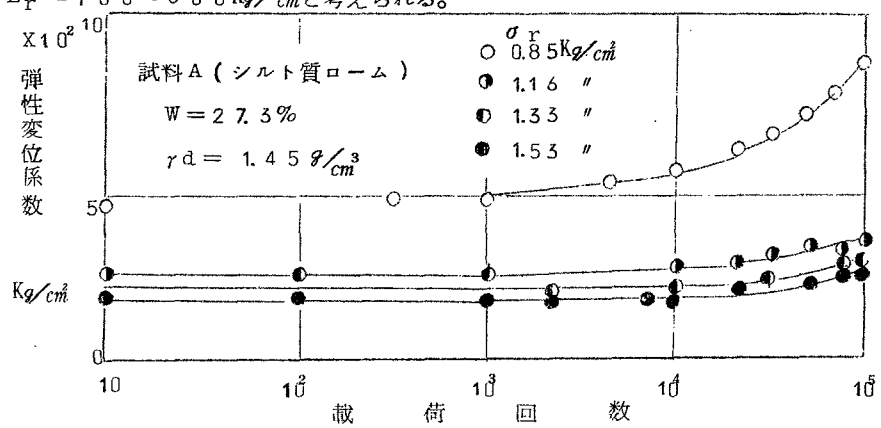


図-3.2 載荷回数、応力と弾性変位係数との関係

このようなくり返し応力を受ける土の変形から、載荷回数の少ないときには、土粒子の配列構造の変化や密度増加によって土に硬化現象が生じるが、載荷回数が増すと、密度増加によらない、粒子間の結合力の増加による硬化現象の生じることが知られる。

#### 第4章 拘束応力を受けている土に くり返し応力を載荷したときの変形

実際の土構造物内のある部分が変形するときには、周囲から変形に応じた拘束応力を受ける。このように周囲から拘束応力を受ける土の挙動を知るために、三軸くり返し応力載荷試験を行った。

供試体が周囲から拘束応力を受ける場合には、供試体内に間ゲキ圧が発生し、みかけの硬化現象が生じる。この拘束応力によるみかけの硬化効果は供試体の性質によって異なり、一般に、含

水比の高いほど拘束応力の影響を大きく受け、残留ひずみ（塑性ひずみの和）は拘束応力の増加とともに急激に減少し（図-4.1）、弾性変位係数の増加率も著しい。

しかし、拘束応力の大きさが同一ならば、くり返し応力の大きさ、あるいは供試体の性質とくり返し応力による土の変形との関係は拘束応力を受けない場合と同じような傾向を示す。

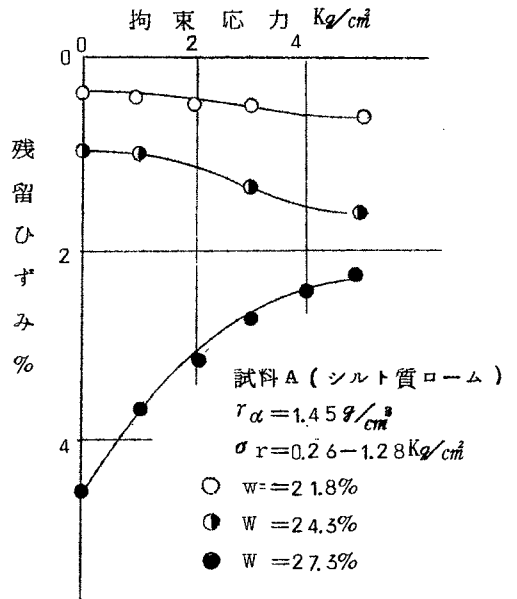


図-4.1 残留ひずみと拘束応力の関係への含水比の影響

## 第5章 くり返し応力を受けた土の圧縮強さ

くり返し応力を受けた供試体を圧縮すると、硬化効果のために、低ひずみに対応する応力が著しく増大するが、変形が大きくなると、この硬化効果は次第に失われる（図-5.1）。

また、圧縮時に大きな拘束応力を受けると、くり返し応力による硬化効果の影響はみられない。

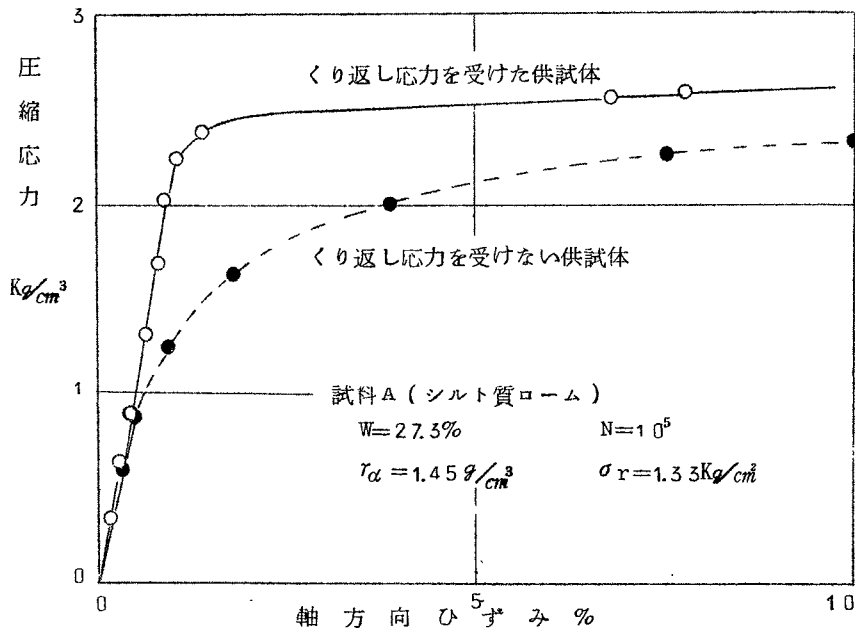


図-5.1 応力-ひずみ曲線へのくり返し載荷の影響

一般に、くり返し応力を受けることによる土の圧縮強さの増加率はくり返し応力度の大きくなるほど大きく、これが増加し始める載荷回数は図-3.2に示したような弾性変位係数の増加し始める点に相当する。

また、くり返し応力載荷による硬化効果は圧縮時の低ひずみに対応する応力によつて表わすことが出来、この硬化効果は載荷回数とともに増大するが、一定回数だけくり返し応力を受ける場合には、硬化効果を最大にするようなくり返し応力が存在し、これより大きい応力を載荷すると、供試体内に局部的な破壊が生じるために、みかけ上硬化効果は減少する。

この硬化効果を最大にする応力はくり返し応力を受けない供試体の最大圧縮強さの50~60%である。

さらに、くり返し応力載荷中の変形と圧縮強さとの関係から、くり返し応力を受ける土の強度変化は単なる締固まりによるものでなく、粒子間の結合力の増加によるものであることが知られる。

## 第6章 くり返し応力を受けた土の力学的性質に関するレオロジー的解析

くり返し応力を受ける土の挙動を表わすレオロジー模型を定め(図-6.1)、この模型を一定の応力速度 $\dot{\sigma}$ で圧縮すると、応力 $(\sigma = \dot{\sigma} t)$ とひずみ速度 $(d\varepsilon/dt)$ との関係は(6.1)式で表わされる。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \left( 1 - e^{-\frac{E}{\eta_1} \cdot \frac{\sigma}{\dot{\sigma}}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_2} + \left[ \frac{1}{\eta_3} (\sigma - \sigma_y)^n \right] \quad \text{----- (6.1)}$$

ここに、[ ]内の項は降伏後に働く。

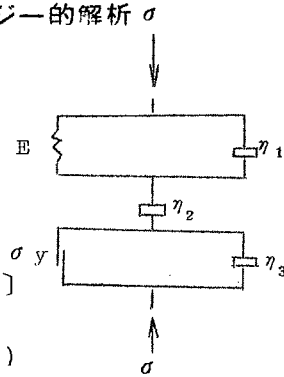


図-6.1 レオロジー模型

(6.1)式に、1)  $n > 1$  (たとえば、 $n = 2$ )、 $\eta_2 = \text{一定}$ 、  
2)  $n = 1$ 、 $\eta_2 = \text{一定}$ 、3)  $n = 1$ 、 $\eta_2 = \infty$  を代入すると、図-6.2に示すようになる。したがって、条件2)、3)の場合には、(6.1)式の右辺の第一項の漸次線(AD)の縦座標 $(\dot{\sigma}/E)$ とこの曲線の折点に対応する応力から、土の弾性係数(E)と降伏応力 $(\sigma_y)$ を求めることが出来る。

くり返し応力を受けた供試体を一定の応力速度 $(\dot{\sigma} = 0.018 \text{ Kg/cm}^2/\text{sec})$ で圧縮すると、図-6.2の条件2)、3)の曲線に類似した関係が得られ、降伏応力と弾性係数を簡単に求めることが出来る。また、くり返し応力載荷中の変形を考えあわせると、粘性係数 $(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ も求められる。

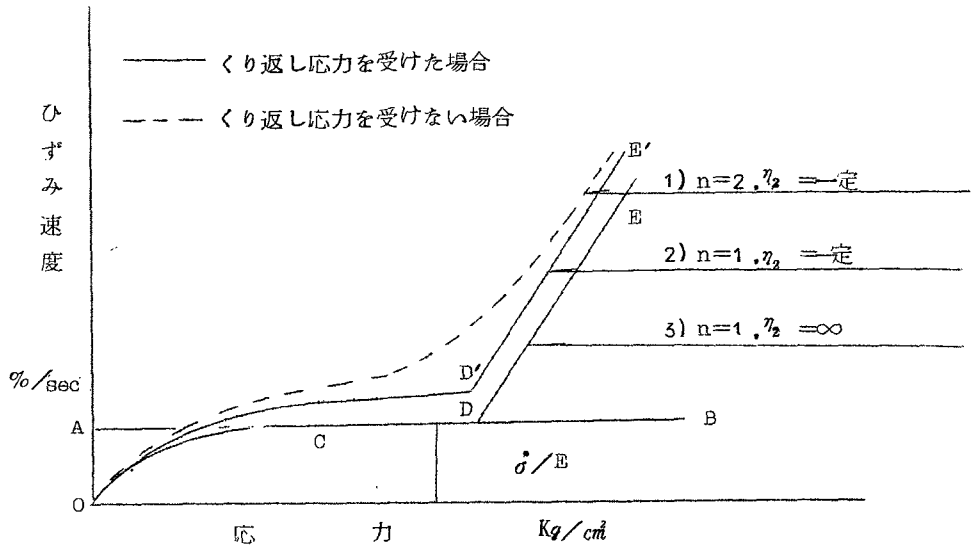


図-6.2 レオロジー模型におけるひずみ速度と応力との関係

このようにして求めた降伏応力 ( $\sigma_{yN}$ ) と载荷回数 ( $N$ ) との関係は (6.2) 式で表わされる。

$$\sigma_{yN} = A \exp f(N) \quad \text{----- (6.2)}$$

ここに、 $A=1$ 、 $f(N) = a + \frac{c}{b+N}$  と仮定し、 $N=0$  を代入すると、くり返し応力を受けない土の降伏応力を推定することが出来る。

また、降伏応力を最大にするくり返し応力が存在し、この値は硬化効果を最大にするくり返し応力より約20%大きい。さらに、粘性土の降伏応力はくり返し応力载荷中の拘束応力の大きなるほど小さく、砂質土ではほとんど変化がない。

レオロジー的解析によつて求めた弾性係数(E)は弾性変位係数より小さいが、くり返し応力度の小さい場合には、弾性変位係数と同様に、载荷回数の多いほど大きい。しかし、くり返し応力度が大きい場合には、ある载荷回数以上になるとむしろ減少する。

この弾性係数は供試体の性質によつて異なるが、くり返し応力を受けない最適含水比の状態にある供試体では、 $E=100 \sim 500 \text{ Kg/cm}^2$  と推定される。

## 第7章 土構造物設計における基準応力の求め方

一般に、土構造物設計の基準応力の求め方としては、破壊時の圧縮強さ、あるいは圧縮時の変形を規制する方法などがあるが、土の変形と強度を同時に規制しうる降伏応力による方法、あるいはくり返し応力载荷中に一定のひずみを生じるに要する応力と载荷回数との関係に基く方法が望ましい。

## 第 8 章 結 論

この研究によつて、締固めた不飽和土にくり返し応力を載荷したときの変形や強度などの力学的性質、あるいは硬化現象など、従来不明であつた多くの点を明らかにすることが出来た。また、くり返し応力を受けた土をレオロジー的に解析し、従来測定のむずかしかつた土の降伏応力や弾性係数を簡単に求めることが出来、これらの値は土構造物の合理的設計の基礎とすることができると考えられる。

## 審 査 結 果 の 要 旨

最近、重要性を増しつつある幹線道路交通において、交通量の激増と交通荷重の重電化の傾向が著しい。このような交通に適応した路床・路盤を合理的に設計するには、土の動力学的性質を基礎としなければならぬが、従来このような土の性質に関する研究は極めて少い。著者はこのように見地から、土質を異にする数種の土について実験的研究を行い、繰返し応力をうける土の力学的性質を明らかにした。この論文はその成果をとりまとめたもので、全編8章から成る。

第1章は緒論である。第2章においては、土の構造、土粒子間に作用する力および間隙圧について、従来の研究を概括し、一般的に記述を行っている。

第3章および第4章は、繰返し応力をうけた土の変形特性に関して行った実験の結果について述べ、それを考察したものである。その中、第3章では拘束応力をうけない締固め土に繰返し応力を加えた場合、また第4章では拘束応力をうける場合の変形の問題を取扱っている。すなわち土が繰返し応力をうける間の回復性ひずみと非回復性ひずみとが、繰返し応力、載荷回数、土質含水量などにより如何に変化するかを詳しく論じ、さらに拘束応力によって弾性変位係数や硬化効果が大きく影響されることを示した。一般に回数の多い繰返し応力を受けた土に生じる硬化効果は、密度変化を伴わないものであることについても明らかにしている。

第5章は繰返し応力をうけた不飽和締固め土について行った強度特性に関する実験の結果について述べている。比較的低い繰返し応力をうける場合には、土中に生じる硬化効果のため、破壊強度や弾性変位係数が高まるなどの変化を生じるが、繰返し応力や拘束応力が高くなるに従い、これらの効果が失われることなどを明らかにしている。これは路盤などの合理的設計を行う上に有用な知見である。

第6章は、力学的性質のレオロジー解析について述べている。すなわち繰返し応力をうける土の挙動を示すレオロジー模型を定め、この模型が圧縮応力をうける時のひずみ速度と応力との関係を実験結果と比較して、模型の諸定数を定め、繰返し応力の載荷によるこれらの諸定数の変化を求めている。特に圧縮試験中のひずみ速度 — 応力関係に基いて弾性係数と降伏応力とを簡単に求める巧妙な方法を導いているが、これは設計の基準値を求める上に重要な新しい知見である。さらにこの方法に基いて繰返し応力をうけない土や、極めて回数の多い繰返し応力をうけた土の降伏応力を推定する方法も示した。

第7章では路盤のような土質構造物の設計の基準として、静的破壊強度によらず、前章に述べた降伏応力を用いる合理的な方法を提案している。

第8章は結論である。



以上要するに本論文は、従来不明の点が多かった繰返し応力をうける土の強度や変形に関する特性を実験的に研究し、多くの新しい知見を得たもので、土質工学上寄与するところが少なくない。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。