

くり返し応力を受けた締固め土の力学的性質

MECHANICAL PROPERTIES OF COMPACTED SOIL SUBJECTED TO REPEATED STRESS APPLICATION

河上 房 義*・小川 正 二**
By Fusayoshi Kawakami and Shoji Ogawa

要旨 本文は、締固めたロームに 10 万回までくり返して、一軸圧縮応力が載荷されたときに生じる残留ひずみおよび弾性ひずみ、その土の弾性変位係数、また、くり返し載荷を受けたのちの力学的性質を知るために行なった一軸圧縮試験における応力—ひずみ関係など、くり返し載荷による土の力学的性質の変化について行なった実験の報告であり、これらの力学的性質におよぼす土の含水比、締固め密度、くり返し応力度、くり返し載荷回数などの影響について述べたものである。

1. ま え が き

最近の交通量の激増にともなって、道路交通の占める役割りは重要性を増してきている。高速自動車道を始めとして、重要な国道や市街地の道路が多く計画され、建設され、あるいはこれに改良が加えられている。特に交通車両の数の増加のみでなく、重量化や高速化の傾向がいちじるしいので、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くり返して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、H.B. Seed らはシルト質粘土の供試体に、種々の軸応力と側圧とをくり返して載荷し、供試体の変形、変形に対する抵抗力、最大圧縮強度の増加について研究したり⁽¹⁾。その結果、くり返し応力を受けたために供試体の主要な性質に生じる変化は、くり返し応力を受け始めた初期に生じること、変位量は載荷法によって異なること、くり返し応力をうけると圧縮強度が高まり、応力—ひずみ曲線の形が変化すること、これらの性質の変化は飽和度が低いときにいちじるしいことなどを明らかにした。

著者らも同様の考えから、締固めたロームの供試体にくり返して一軸圧縮応力を加え、その残留変位、弾性変位および一軸圧縮試験の応力—ひずみ関係などにおよぼすくり返し載荷の影響を研究し、これらの力学的性質が含水比、締固め密度、くり返し応力度、載荷回数によっていかに変化するかを明らかにしようとした。さらに以上の結果にもとづいて、許容されるひずみと載荷回数

が定められた場合の限界応力の決定法について述べようとするものである。

なお、以下において使用する二、三の記号の説明を掲げるとつぎのとおりである。

σ : くり返し応力度

l : 供試体の高さ

δ : 残留変位 (くり返し応力を除いた際に供試体に残る軸方向変位)

δ_r : 弾性変位 (くり返し応力を除いた際に供試体が反撥する軸方向変位)

ϵ : 残留ひずみ, $\epsilon = \delta/l$

ϵ_r : 弾性ひずみ, $\epsilon_r = \delta_r/l$

E_r : 弾性変位係数, $E_r = \sigma/\epsilon_r$

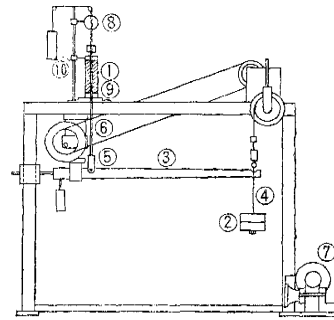
T : 初期接線係数

N : くり返し載荷回数

2. 試験装置

この試験に用いたくり返し圧縮応力載荷装置の機構の概要は図—1のとおりである。モーター (7) に接続され

図—1 試験機の略図



たワイヤ (4) で吊り下げられた荷重 (2) が周期的に挺子 (3) に載荷または除荷され、これは 10 倍に拡大されて、支点 (5) およびフレーム (6) を経て、供試体 (1) の軸方向に加えられる。試験中、挺子は水平を保つように調節され、応力系の平衡を保つようにしてある。

任意のくり返し回数の載荷時に供試体に生じる全ひずみ、または除荷時の残留ひずみはダイヤルゲージ (8) によって測定できる。またくり返し試験中の任意の期間、特に試験の初期における応力とひずみの関係を求めるため、供試体の受台として用いた圧力変換器 (9) と、供試体頂部に接触させた焼青銅板片 (10) に貼付したストレーンゲージの抵抗の変化を電磁オッシログラフによって

* 正員 工博 東北大学教授 工学部

** 正員 工修 東北大学大学院工学研究科

記録した。

くり返し載荷を受けた供試体の圧縮試験には、油圧式一軸圧縮試験機を用いた。

3. 試料および供試体

試料は仙台市近郊で得られたロームで、空気乾燥したのち粉碎し、1.2 mmふるいを通過するものを用いた。試料の物理的性質は、表-1 のとおりである。

表-1 試料の物理的性質

w_p 26.2%	突固めの最適含水比	29.4%
w_L 67.7%	標準突固めの最大乾燥密度	1.42 g/cm ³
	同上における粘着力	0.73 kg/cm ²
	同じく内部摩擦角	15°30'

気乾した試料土に所定の含水比を得るために必要な水を加え、入念に練り混ぜたのち密閉容器内に 24 hr 以上格納し、水分の均霽をはかった。この試料を Harvard の小型タンパー（先端の直径 13 mm）を用いて、直径 50 mm、高さ 126 mm の円筒形モールド内で突固めた。供試体は脱枠後ただちにその外面をパラフィンで薄く被覆し、再び密閉容器内に 24 hr 以上格納したのち、上下端面のパラフィンを除去して試験に供した。

力学的性質におよぼす密度と含水比の影響を知るために、密度が同一（1.45 g/cm³）で含水比の異なるもの（表-2 の ①②③④）および含水比が一定（27.2~3%）で密度の異なるもの（表-2 の ⑤⑥⑦）の 2 群の供試体を製作した。ただし含水比 30.2% の試料では密度 1.45 g/cm³ を得ることができなかつたので、密度を 1.43 g/cm³ とした。

表-2 供試体の種類

供試体の種類	含水比 (%)	平均密度 (g/cm ³)	平均圧縮強度 (kg/cm ²)
①	30.2	1.43	1.64
②	27.3	1.45	2.37
③	24.3	1.45	3.39
④	21.8	1.45	3.94
⑤	27.2	1.50	3.04
⑥	27.3	1.48	2.82
⑦	27.3	1.43	2.08

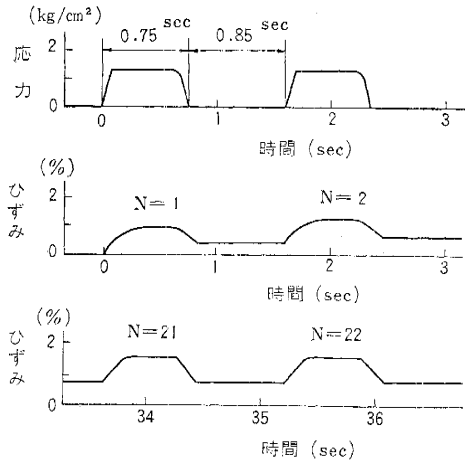
4. 試験の方法

くり返し載荷中の供試体の力学的性質におよぼすくり返し応力度の影響を知るために、供試体のそれぞれの種類ごとに、5~7 段階の応力を 10 万回ずつ載荷した。応力の段階は、供試体の種類ごとに、その静的一軸圧縮強度を基準にして定めた。

上述のように供試体の外周は試験中の含水比の変化を防ぐため薄くパラフィンで被覆してあるが、さらに載荷板に設置したのち供試体にはゴムスリーブをかぶせた。

載荷中の供試体の変位と除荷後の残留変位（塑性変位）は、載荷回数と対比しながらダイヤルゲージで測

図-2 応力とひずみ



定した。なおオシログラフで記録したくり返し試験の初期における供試体に加えられた圧縮応力と軸方向ひずみの時間に対する変化の状況は図-2 のようである。すなわち 1 回の載荷時間は 0.75 sec、除荷時間は 0.85 sec であり、1 サイクルの時間は 1.60 sec である。

また、くり返し応力を受けたのちの供試体の力学的性質の変化を知るために、5~7 段階の応力を 5×10^3 , 10^4 , 5×10^4 および 10^5 回載荷した供試体について応力制御の方法で一軸圧縮試験を行ない、それぞれの応力-ひずみ曲線を求めた。

5. くり返し応力載荷試験の結果

(1) 残留ひずみに対するくり返し応力の影響

a) 含水比 (w) と $\log N$ - ϵ 曲線の形状との関係 締固め密度がほぼ等しく ($w=30.2\%$ の場合だけやや低い)、含水比が異なる場合の、残留ひずみ (ϵ)、載荷回数 (N)、くり返し応力度 (σ) の関係を図-3, 4, 5 に示した。この三図を比較して見ると、いずれもくり返し応力度が高まると、残留ひずみは増大するが、その増加の割

図-3 載荷応力、回数と残留ひずみ

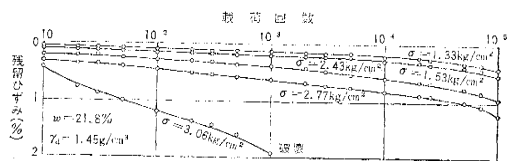


図-4 載荷応力、回数と残留ひずみ

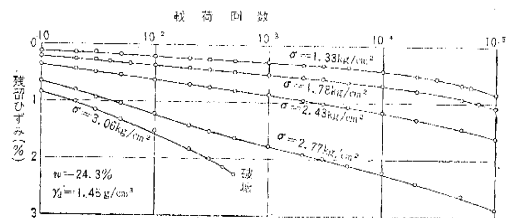
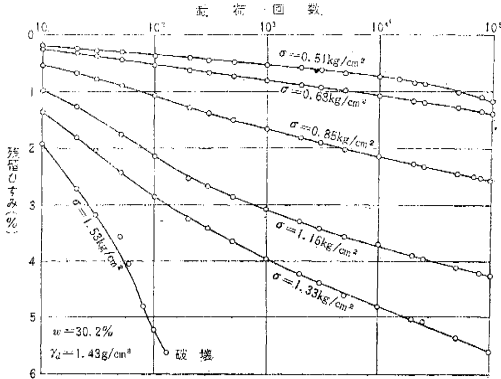


図-5 載荷応力, 回数と残留ひずみ



合は含水比が低いほど小さく、 $w=21.8\%$ と $w=24.3\%$ 等の場合(比較的含水比が低い場合)には、 $\log N-\epsilon$ 曲線は応力度がかなり高くなって類似した形状を示している(図-3,4 参照)。しかし含水比が高い場合には、残留ひずみの大きさはくり返し応力度の影響を大きく受けるばかりでなく、 $\log N-\epsilon$ 曲線の形状がくり返し応力度の低いときと高いときとは異なる(図-5)。すなわち含水比が低い場合、あるいは含水比が高いが応力度が低い場合には、くり返し載荷による硬化現象の効果が低い、くり返し応力が供試体に破壊を生じるほど大きくないかぎり、応力度が高いと硬化現象の効果が大きく、このことは試料の含水比が高い場合にいっそういじめるしい。例えば図-4において、 $\sigma=3.06 \text{ kg/cm}^2$ のときは、500回の載荷で残留ひずみ ϵ は 2.2% に達し、供試体は破壊したが、 $\sigma=2.77 \text{ kg/cm}^2$ では 10 万回の載荷で残留ひずみ ϵ は 2.9% に達するにもかかわらず破壊を生じない。これは破壊を生じない程度の応力を回数多く載荷するほうが硬化現象の効果がいじめるしいためであると推定できる。

b) 密度 (γ_d) と $\log N-\epsilon$ 曲線の形状との関係 一定の含水比 ($w=27.2\sim 3\%$) を有する試料を用いて、密度の異なる四種の供試体 ($\gamma_d=1.50, 1.48, 1.45, 1.43 \text{ g/cm}^3$) を作り、その各種ごとに 5~6 段階に応力を変化させてくり返し載荷試験を行ない、図-3~5 に準じて

図-6 載荷応力, 回数と残留ひずみ

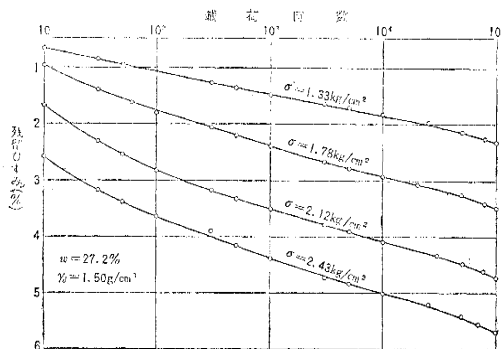
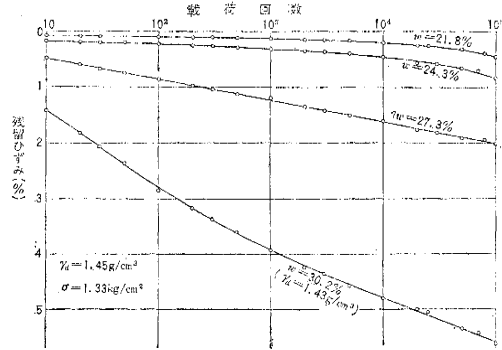


図-7 載荷回数, 含水比と残留ひずみ



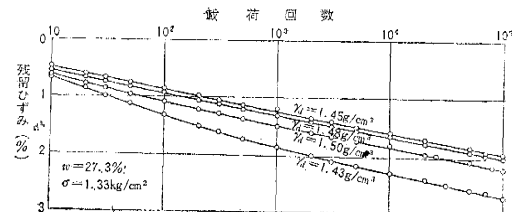
$\log N-\epsilon$ 曲線を描いた。その一例 ($\gamma_d=1.50 \text{ g/cm}^3$ の場合) は図-6 のとおりである。この図と前掲の図-3~5 とを比較すると、 $\log N-\epsilon$ 曲線の形状は始めの供試体の密度が異なっても類似していることが知られる。

(2) 残留ひずみに対する含水比と密度の影響

図-7 は、含水比が異なり ($w=21.8, 24.3, 27.3, 30.2\%$)、密度が同一 ($\gamma_d=1.45 \text{ g/cm}^3$ 、ただし $w=30.2\%$ の場合のみ $\gamma_d=1.43 \text{ g/cm}^3$) の 4 種の供試体に、同一の応力 ($\sigma=1.33 \text{ kg/cm}^2$) をくり返し載荷した場合の $\log N-\epsilon$ 関係を示すものである。この曲線は、ほぼ塑性限界を境にして、含水比の高低によって形状を異にする(載荷回数の対数に対して、残留ひずみは漸減、または漸増)。試料の含水比が塑性限界以下の場合には、残留ひずみの増加は載荷回数の対数に対し漸増する傾向を有するが、含水比が塑性限界以上のときは、くり返し載荷にもとづく硬化現象がいじめるしいため、残留ひずみは漸減する。このような傾向は、上述のように各供試体に同一の応力をくり返して載荷した場合にかぎらず、それぞれの種類の供試体の静的圧縮強度の 65% の応力をくり返し載荷した場合にも見られる。

また図-8 は、含水比一定 ($w=27.3\%$) で密度を異にする ($\gamma_d=1.43, 1.45, 1.48, 1.50 \text{ g/cm}^3$) 供試体に、一定の応力 ($\sigma=1.33 \text{ kg/cm}^2$) をくり返して載荷した場合の $\log N-\epsilon$ 関係を図示したものである。この図で見るように、当初の密度が特に高いか、または低いとき、すなわち、供試体に加えられた締固めエネルギーが特に大きい、または小さいときに、残留ひずみが大きく、中間の密度では小さい。しかし各供試体にそれぞれの静的圧縮強度の 65% の応力をかけたときは、締固め密度が

図-8 密度, 載荷回数と残留ひずみ

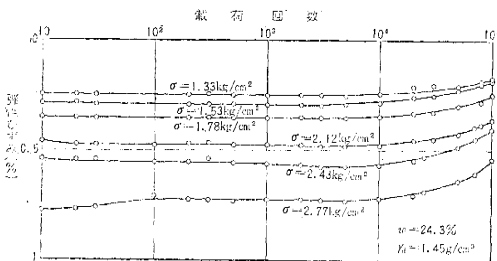


低いほど残留ひずみが小さく、密度が高いほど、すなわち締固め度が高いほど大きい残留ひずみが見られる。

(3) くり返し载荷を受けた土の弾性ひずみ

弾性変位 (δ_p) は、ある回数の载荷中の最大変位と、除荷後の最小の変位との差で表わされる。この実験の範囲では、载荷回数が 10~5000 のときは、弾性ひずみはくり返して载荷した応力度に応じてほぼ一定の値を示すが、载荷回数が 1 万回前後になると急に激少する (図-9)。この傾向は含水比が高いほど、またくり返し応力が大きいほどいちじるしく、弾性ひずみも含水比および応力度が高いほど大きい。しかし供試体の当初の密度による差異はほとんど認められない。

図-9 载荷応力、回数と弾性ひずみ



(4) くり返し载荷を受けた土の弾性変位係数

任意の回数のくり返し载荷時の弾性ひずみ (ϵ_p) から弾性変位係数 (E_p) を求め、これとくり返し载荷回数 (N)、くり返し応力度 (σ) との関係を図示すると、図-10 のようになる。すなわち弾性変位係数はくり返し応力度の小さいほど大きく、その値は载荷回数が 1 万回を超えると急に増大する。そして、その増大の割合は、く

図-10 载荷応力、回数と弾性変位係数

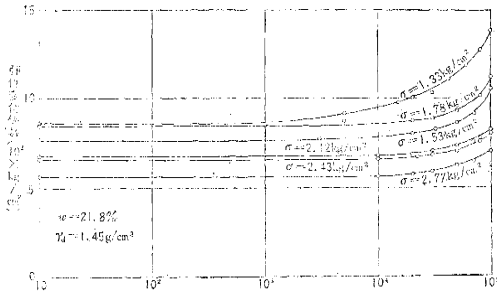
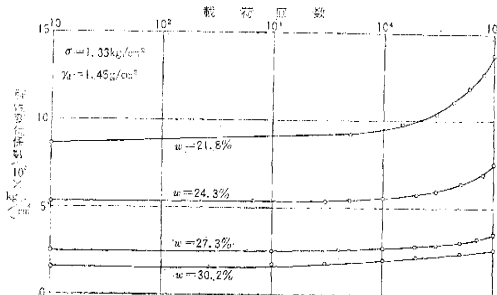


図-11 载荷回数、含水比と弾性変位係数



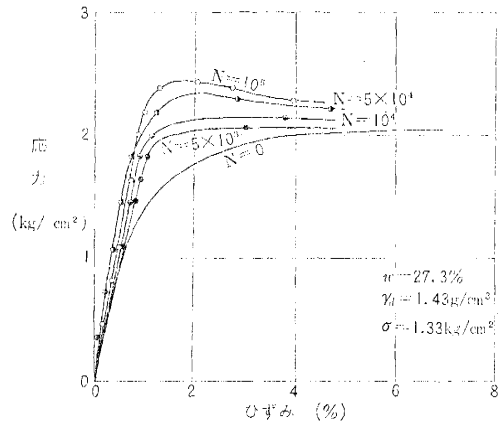
り返し応力度が低いほどいちじるしい。

図-11 は含水比が弾性変位係数の変化におよぼす影響を图示したものであるが、含水比が低いと弾性変位係数が大きいことを示している。なお供試体の密度の変化によっては弾性変位係数はあまり変化しない。また载荷回数の増加にともなう弾性変位係数の増加の傾向は、含水比が低いほどいちじるしい。

6. くり返し载荷された後に行なった一軸圧縮試験の結果

所定のくり返し载荷を行なった供試体について、一軸圧縮試験を行ない、応力-ひずみ曲線を求めた。その例を図-12 に示す。くり返し载荷を受けない供試体では、始めから非弾性的な応力-ひずみ曲線を示すが、くり返し载荷を受けると、ちょうど鋼の応力-ひずみ曲線³⁾と類似した弾塑性体のような形の応力-ひずみ曲線を示す。すなわち、低ひずみのときは硬化現象によって弾性的な挙動を示すが、ひずみが増大するとその効果が失われ、塑性的挙動を示し、ある応力に達するとひずみは急激に増大する。一般にくり返し载荷による硬化現象は载荷回数の大きいほどいちじるしい。

図-12 応力-ひずみ関係



7. 考 察

細粒分をかなり多量にふくみ、弾性ととともに粘性も示すような土が、外部からくり返して圧縮力を受けると、土の種類によって程度の差はあるが、容積変化を生じ、その圧縮強度も変化する。これらの強度・変形・弾性係数などにおよぼすくり返し载荷の影響について、二、三の考察を行なえばつぎのとおりである。

(1) くり返し载荷をうけた土の圧縮強度について

一般にくり返し载荷を受けたのちの土の一軸圧縮強度は、くり返し応力度が高いほど、またくり返し回数が多いほど高くなる (例えば 図-13)。このようなくり返し载荷による不完全飽和土の強度の増加についてはこれまでも認められており、それはくり返し応力度・载荷回

図-13 くり返し応力, 含水比と一軸圧縮強度

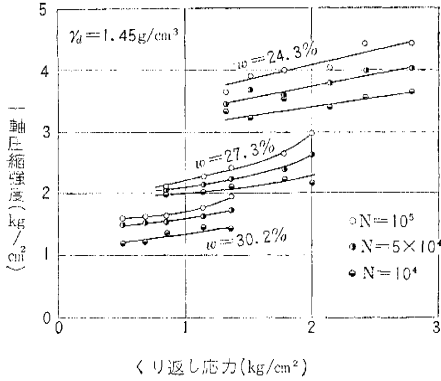
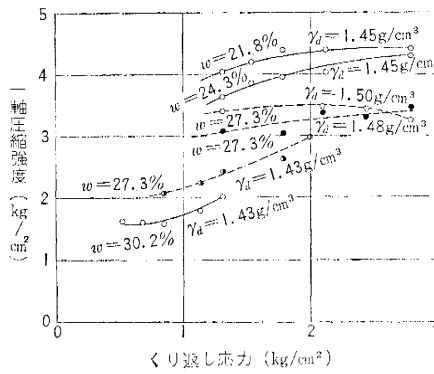


図-14 くり返し応力, 密度と一軸圧縮強度



数・载荷中の軸方向圧縮ひずみが大きいほどいちじるしいとされていたが¹⁾, この実験ではこれらの影響のほか, 供試体の一軸圧縮強度におよぼす当初の締固め密度や含水比の影響についても明らかにした。すなわち概括的にいえば, くり返し载荷を受けない供試体の一軸圧縮強度と同じく, 密度が高いほど, また含水比が低いほど一軸圧縮強度が高い。そしてくり返し応力度の増大による一軸圧縮強度の増大は, 比較的密度の低い供試体においていちじるしく, 最初に十分締固められた供試体ほど顕著でない(図-14)。このように密度の高い供試体が, 高いくり返し応力を受けても一軸圧縮強度が増加せず, むしろ低下するようなこともあるのは, これらの供試体では過転圧に近い状態に締固められているので, 一軸圧縮強度におよぼすくり返し応力の影響が現われなためである。さらに一定回数をくり返し得る最大応力度, いいかえれば一定のくり返し回数で破壊を起こす応力度(回数が多くなると疲労限界に近づく)は, 含水比が高まるにつれて低下する(図-13)。

(2) くり返し载荷を受けた土の変形について

不完全飽和土がくり返し応力をうけると, 変形に関する性質が変化する。すなわち, くり返し応力を受けると, くり返し回数の増大にともなってひずみの増加割合は減少する。Seed らは, この現象はくり返し応力度と回数によって支配されるもので, くり返し回数 $N=1000$ 以上になると明らかに見られるとしているが^{1), 3), 4)}, この実験ではくり返し载荷回数が1万回以上になって始めて顕著に現われ(例えば 図-11), また前述したようにくり返し応力のほかに含水比や当初の密度によっても影響されることが知られた(図-3~8)。たとえば载荷回数(対数)に対する残留ひずみの増加割合を見ると, ほぼ塑性限界を境にしてその傾向が異なり, 含水比の高い供試体では回数(対数)が増大するとひずみの増加割合が低くなるが, 含水比が低いと反対の傾向を示す。これは T.W. Lambe らのいう⁹⁾ 含水比による土粒子の配列構造の差異にもとづくものであろう。

このように, 土中に内部破壊を生じない限度で高い応

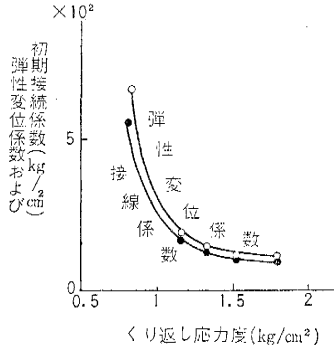
力をくり返し载荷する場合, あるくり返し回数を越えるとくり返し応力が低い場合よりひずみの増加割合が低い, すなわち変形に対する抵抗が大きいのは, 不整な配列状態にある土粒子に高い応力が加えられると,

低い応力が加えられたときよりもすみやかに平行配列状態に近づき, 間げきも減り, 粒子間に働く電位エネルギーも大きくなるので, ある大きさの変位を生ぜしめるのに必要なエネルギーが大きくなり, いいかえれば一定のエネルギーによって生じるひずみの増加割合が低くなるためであろう。Seed は, 初期飽和度の高い供試体ではこれと反対にくり返し载荷によって変形に対する抵抗がかわって低下すると述べているが⁴⁾, くり返し加えられる応力がある限界以下であれば, 初期飽和度が高くてもくり返し回数に応じてひずみの増加割合はかなり減少している(図-5 参照)。しかし, くり返し応力が供試体の内部に破壊を生ぜしめるほど大きい場合には, 比較的少ない回数のくり返し载荷で供試体に破壊が生じるので, くり返し载荷によるひずみに対する抵抗の増大はほとんど認めることはできない。

(3) くり返し载荷を受けた土の弾性係数について

含水比 $w=27.3\%$, 締固め密度 $\gamma_d=1.45 \text{ g/cm}^3$ の供試体に異なる応力をくり返し载荷し, 10万回日の载荷サイクル中に求めた弾性変位係数 E_r と, 10万回のくり返し载荷の後にに行なった一軸圧縮試験から求めた初期接線係数とを比較すると, 図-15 のように, 弾性変位

図-15 くり返し応力と弾性係数



係数のほうがわずかに大きい, 両者ともくり返し応力度に対してきわめて近似した変化を示す。すなわち両方の係数とも, くり返し応力度が高いと小さく, くり返し応力度が低くなると (1 kg/cm^2 以下), 急に増大する。この関係から, 任意回数のくり返し载荷を受けたのち土の接線係数は, 圧縮試験を行なわなくとも, くり返し载荷中の弾性変位係数から推定できる。なお, この結果は Seed らの「供試体が破壊しない

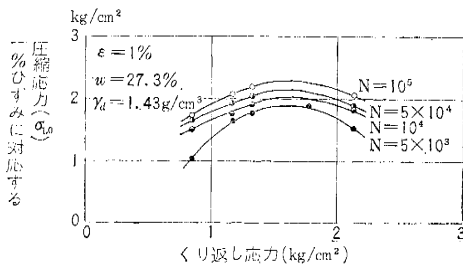
かぎりくり返し応力が大きいほど、弾性変位係数が大きい」という^{3),4)}結論とは相反しているが、これは Seed のいう弾性変位係数が回数が多いくり返し载荷中に求めたものでないためである。

(4) くり返し载荷によって土に生じる硬化現象について

上述のように、土がくり返し载荷を受けると強度が高まり、ひずみの増加割合が減少し（ひずみに対する抵抗が増し）、あるいは弾性係数が大きくなるなどの現象は、土として細粒子からなる土の構造に生じる硬化現象によるものである。T.W. Lambe らは、この現象は (a) 土粒子相互間に働く電位エネルギー、(b) 土粒子の配列、(c) ミセルの径の変化、(d) 土-水系の特質などによって支配されるとしており、そのうち (a)、(c) は土の弾性挙動に、また (a)~(d) のそれぞれは圧縮強度に影響すると推論している⁹⁾⁻¹¹⁾。

この実験においては、くり返し载荷をうけたのちの供試体について行なった一軸圧縮試験において、低ひずみ（1% ひずみ）を生ぜしめるような応力（ $\sigma_{1.0}$ ）とくり返し応力との関係を求め、これによって、これまで明確でなかったくり返し载荷と土に生じる硬化現象との関係を明らかにし得た。図-16 は、1% ひずみに対応する応

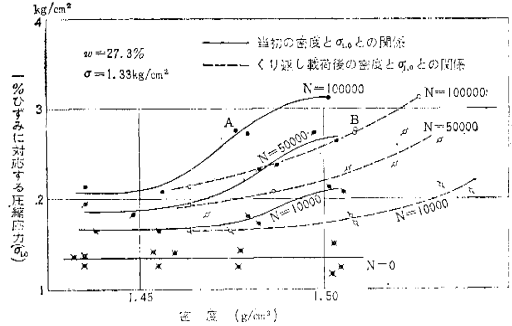
図-16 低ひずみに対する応力の変化



力とくり返し応力との関係の一例を示したものである。すなわち、 $\sigma_{1.0}$ は载荷回数とともに増大するが、同じくり返し回数の場合 $\sigma_{1.0}$ はある限度までは応力度とともに増大し、くり返し応力度がある限度を越えると $\sigma_{1.0}$ はかえって減少する。この傾向は、含水比および密度を異にする他の供試体についても共通して見られる。これからくり返し载荷にもとづく硬化現象は、くり返し応力度と回数によって影響されることがわかる。

さらに供試体の当初の密度（くり返し载荷を受けない供試体の密度）と $\sigma_{1.0}$ との関係、ならびに、くり返し载荷を受けたのちの供試体の密度と $\sigma_{1.0}$ との関係の一例を図示すると、それぞれ 図-17 の実線および破線のようになる。この図は、含水比 $w=27.3\%$ 、くり返し応力度 $\sigma=1.33 \text{ kg/cm}^2$ の場合について示したものであるが、たとえば図中 A 点で示される当初の密度を有する供試体の密度は、10 万回のくり返し载荷をうけると B 点まで増加する。しかし、この図から载荷回数が 1 万、5 万およ

図-17 供試体の密度と低ひずみに対応する圧縮応力



び 10 万回のいずれの場合でもくり返し载荷をうけたために生じた密度の増加（A および B 点のように対応する二点間の横距で表わされる）は、くり返し回数のいかに関係なく $0.02 \sim 0.03 \text{ g/cm}^3$ 程度である。すなわち、くり返し载荷による密度の増加（縮固り）はくり返しのごく初期に起こるのに対し、 $\sigma_{1.0}$ の増加はくり返し回数が増すにしたがって顕著である。また図中に $N=0$ と注記した線は、くり返し载荷をうけない供試体の縮固め度を変えて、それぞれの $\sigma_{1.0}$ を求めた結果を示したものであるが、縮固め度（当初の密度）が異なっても、くり返し载荷をうけなければ $\sigma_{1.0}$ は変わらない。このように、くり返し载荷によって $\sigma_{1.0}$ が変化することと、前述のように弾性変位係数 E_p が $N=10000$ ぐらいになると増大すること（図-10 参照）とをあわせ考えると、くり返し载荷をうけた土の力学的性質の変化は、単なる縮固りにもとづくものでなく、硬化現象にもとづくものであることがわかる。

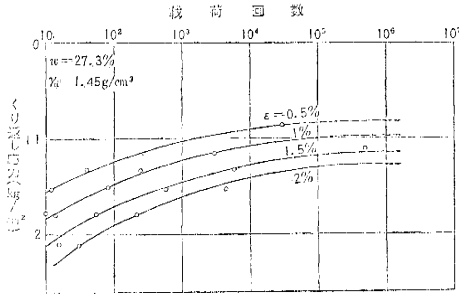
なお、くり返し载荷をうけた供試体の一軸圧縮強度がくり返し载荷回数につれて増加する割合が、 $\sigma_{1.0}$ の増加割合ほどいじりしくないのは、供試体のひずみが大きくなると硬化現象の効果が失われるためであろう。このことは Seed ら^{3),4)}の見解と一致する。

(5) 限界圧縮応力の決定方法について

前掲の 図-3,4 および 5 のような、残留ひずみ (ϵ)、くり返し载荷回数 (N) およびくり返し応力度 (σ) の関係を示す曲線群から、試料にある大きさの残留ひずみを生ぜしめるような応力度を求め、これと载荷回数との関係を図示すると 図-18 のような曲線が得られる。いま、ある土質構造物の部分に許容される最大残留ひずみを規定すると、その構造物の材料として用いた土について描いた 図-18 のような関係図から、ある载荷回数に対する許容くり返し応力度を定めることができる。また無限回数の载荷によってある限度の残留ひずみを生じたときを疲労限界に達したと定義すると、この図から疲労を生じない限界のくり返し応力度を求めることができる。

8. 結 論

図一八 ひずみに対するくり返し応力の限界



この実験から得られたおもな結論はつぎのとおりである。

(1) 締固めたロームにくり返し応力を載荷したときに生じる残留ひずみは載荷回数が増すにつれて漸増するが、その大きさはこれまで認められていたようにくり返し応力度およびくり返し回数の影響をうけるほか、含水比と締固め密度によっても支配される。すなわち含水比が低いほど残留ひずみが小さく、さらに、くり返し載荷回数の対数に対する残留ひずみの変化の割合は、塑性限界より低い含水比の場合にはくり返し回数が増すにつれて増大するのに反し、含水比が塑性限界より高い場合には比較的少ないくり返し回数にときに大きい。また締固め密度と残留ひずみとの関係は、同一の応力度と回数くり返し載荷を受ける場合、残留ひずみが最小になるような締固め密度があり、密度がこれより高くても、あるいは低くても、生じる残留ひずみが大きくなる。

(2) くり返し載荷中に見られる弾性ひずみは、含水比が高いほど、またくり返し応力度が高いほど大きい。しかし含水比とくり返し応力度が同一の場合、この実験に用いた試料については、載荷回数が1万回以下では残留ひずみの大きさはほとんど変化せず、載荷回数これを越えると急に減少する。これは Seed らが載荷回数1000回を越えるとひずみに対する抵抗の増加が現われるとしているのとはかなり相違する。なお供試体の締固め密度の差による弾性ひずみの大きさの差は顕著でない。

(3) 静的一軸圧縮試験において塑性的挙動を示す締固めたロームの供試体に、あらかじめくり返し応力を加えたのち静的一軸圧縮試験を行なうと、その応力-ひずみ曲線の形はくり返し応力を受けない供試体のそれとは全く異なり、圧縮の始めに明らかな弾性挙動を示す弾塑性体のような形を示す。くり返し応力をうけたのち土の一軸圧縮強度は、従来認められていたくり返し載荷の影響のほか、土の含水量および密度によっても変化する。すなわち、くり返し載荷をうけない土の一軸圧縮強度と同様に、密度が高いほど、また含水比が低いほど一軸圧縮強度は高い。しかし、くり返し載荷による一軸圧縮強度の増大の割合は、密度が低いほどいちじるしく、密度

が高い場合には顕著でない。

(4) くり返し載荷試験中に求めた弾性変位係数と、くり返し載荷試験後に行なった一軸圧縮試験から求めた初期接線係数のくり返し応力度に対する変化はきわめて類似している。これらの係数は、くり返し応力が小さいほど、また含水比が低いほど高い値を示す。しかし含水比が高い供試体では、くり返し応力度が相違してもこれらの係数の変化が小さく、また供試体の締固め密度による差異も顕著でない。くり返し応力度が低いとき、弾性変位係数が大きくなるのは、Seed らの実験とは相反する結論である。締固めたロームの弾性変位係数は 10^2 kg/cm^2 のオーダーである。

(5) くり返し応力をうけると土の強度および変形に対する性質が変化するのは、土の構造に生じる硬化現象のためである。硬化現象の効果は、くり返し応力をうけた供試体について行なった一軸圧縮試験において、低ひずみに対応する応力がくり返し応力を受けない供試体のそれにくらべて増大することによって、明確に認められる。この効果はひずみが小さい場合には顕著であるが、ひずみが大きくなると不明確になる。締固めたロームに一定の大きさの応力をくり返し載荷すると載荷回数の大なるほどこの効果は大きくなり、また一定回数のくり返し載荷を行なうときは、最大効果を示すようなくり返し応力度が存在し、応力度がこれより高くても、または低くても効果が低下する。くり返し載荷試験中の密度の増大(締固り)は、くり返しのごく初期に起こるのに反し、強度および変形に関する性質の変化はくり返し回数がかかり多くなってから顕著に見られることから、硬化現象は土粒子の締固りによるものでなく、T.W. Lambeらのように、土粒子間に働く電位エネルギーや土粒子の配列の変化などにもとづくものであろう。

参考文献

- 1) Seed, H.B., Chan, C.K. and Monismith, C.L. : "Effect of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay". Proc. H.R.B., Vol. 34 (1955).
- 2) Seed, H.B. and McNeill, R.L. : "Soil Deformations under Repeated Stress Applications". Conference on Soils for Engineering Purposes, Mexico City, 1957. A.S.T.M. Spec. Tech. Publ. 232.
- 3) Seed, H.B. McNeill, R.L., and Guenin, J. de. : "Increased Resistance to Deformation of Clay Caused by Repeated Loading". Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM2 (May 1958).
- 4) Seed, H.B., and Chan, C.K., : "Effect of Stress History and Frequency of Stress Application on Deformation of Clay Subgrades under Repeated Loading. Proc. H.R.B. Vol. 37 (1958).
- 5) 中川有三 : "塑性学"
- 6) Lambe, T.W. : "The Structure of Inorganic Soil". Proc. ASCE, Vol. 79 No. 315 (1953).
- 7) Lambe, T.W. : "The Structure of Compacted Clay", Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM2 (May 1958).
- 8) Lamb, T.W. : "The Engineering Behavior of Compacted Clay". Jour. Soil Mech. Div. ASCE Vol. 84 SM2 (May 1958).
- 9) Trollope, D.H., and Chan, C.K. : "Soil Structure and the Step-Strain Phenomenon". Jour. Soil Mech. Div. ASCE. Vol. 86 SM2 (April, 1960).

(原稿受付: 1962. 12. 5)