

繰返し载荷による粘性土の挙動

宮内定基*

Behavior in Cohesive Soil Subjected to Repeated Loading

Sadaki MIYAUCHI

Faculty of Agriculture, Ehime University

I はじめに

土への繰返し载荷状態は、道路での自動車荷重や締固め時のローラの繰返し通過をはじめとして、現場においてもしばしば発生する。このような繰返し载荷条件下にある土の挙動を解明することは、土木工学の分野のみならず、基礎的な土の動的性質に関する研究の一環としても興味ある内容である。この種の研究が軌道に乗り始めたのは、1950年代の Seed ら¹⁾の研究からであろう。その後、多くの研究者によって興味深い研究が進められてきている。繰返し载荷試験とは、一般に2~5 Hz以下の振動数で、数パーセント以上のヒズミを対象とする場合を指す。現在までのところ、これに対応する普遍的な応答理論が確立されていないために²⁾、この分野では実験的研究が主流を占めている。

これらの実験的研究から、主として変形特性をはじめとする巨視的挙動に、いわゆる繰返し効果の現れることが数多く報告されている。これらの巨視的な繰返し効果を、微視的な繰返し効果との関連で統一的に理解することは、土の動的性質の一般化のみならず、土壌物理学的にも非常に有益なことであると考えられる。しかし、現状では統一的な理解をするには至っていない。

本拙論では、繰返し载荷時の巨視的挙動と微視的挙動の関連性の解明に主眼を置きながら、研究の発展経過と現状を概観し、今後の研究方向を模索しようとするものである。

II 巨視的挙動

1. 変形特性

粘性土への繰返し载荷に関する研究経過の概要を、表-1にまとめて示した。この表から、この研究課題が取り上げられて以来、変形特性等の巨視的挙動の解明に主眼の置かれてきたことがわかる。そこで、本章では巨視的挙動を変形特性と強度特性に大別して、年代順にそれらの概要を調べてみたい。

Seed ら^{1)~5)}は、一連の研究から以下のことを明らかにしている。

まず最初に、改正A.A.S.H.O.締固め試験で約90%密度

に締め固めたシルト質粘土に、28~100PSIの各種軸応力で1分間に1~20回の周期で10,000~100,000回繰返し载荷した。その結果、軸ヒズミは含水比、载荷ひん度、軸応力等の実験条件の違いに拘わらず、载荷回数を増すに従って増加し、その変形量は、同じ大きさの持続応力を受けた場合よりもかなり大きいことを明らかにしている。

続いて、応力履歴が変形特性に及ぼす影響に関する実験の一例を示したのが図-1である。この図から、7.1PSIの応力を繰返し载荷される場合に、以前に5.6PSIの応力を数多く受けた供試体ほど、硬化という形で現れる質変化の程度も大きくなる傾向のあることがわかる。しかし、1,000回程度の繰返し载荷による応力履歴の影響は一時的であり、顕著な硬化を発生させる回数は10,000回以上であることもわかる。

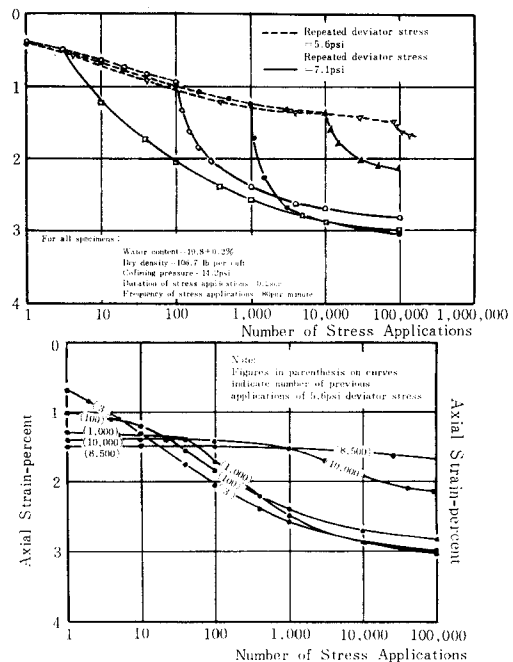


図-1 以前に加えた载荷回数が続く繰返し応力下での変形に及ぼす影響(シルト質粘土)

* 愛媛大学農学部

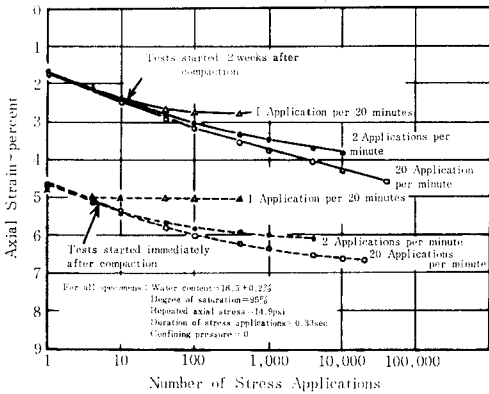
表一 粘性土への繰返し載荷に関する研究経過の概要

研究者	供試土	載荷方式	研究の主目的
Seed, Chan & Monismith (1955) ¹⁾	シルト質粘土	三軸, 最多 載荷回数 100,000	繰返し載荷回数と載荷重が強度と変形に及ぼす影響の解明
Seed & McNeill (1956) ²⁾	シルト質粘土, シルト	三軸, 同上 1,000	繰返し載荷が応力へヒズミ特性に及ぼす影響の解明
Seed & Chan (1958) ³⁾	シルト質粘土	三軸, 同上 100,000	繰返し載荷条件下の変形に関する応力履歴と載荷回数の効果の解明
Seed, McNeill & Guenin (1958) ⁴⁾	シルト質粘土	三軸, 同上 180,000	繰返し載荷による性質変化に対する応力履歴の影響とその原因の考察
Seed & Chan (1961) ⁵⁾	シルト質粘土, 粘土質砂	三軸, 同上 180,000	繰返し載荷時の持続時間と休止時間の長短が変形に及ぼす影響の解明
Larew & Leonards (1962) ⁶⁾	シルト, 粘土, 砂質粘土	三軸, 同上 400,000	繰返し載荷を受けた粘性土の強度規準の確立
Johanson & Yoder (1963) ⁷⁾	砂とシルト(粘土35%)の混合土	三軸, 同上 100,000	繰返し載荷条件下の砂とシルトの混合土の間ゲキ水圧と体積変化の解明
河上, 小川 (1963) ⁸⁾	ローム	一軸, 同上 100,000	繰返し載荷による残留ヒズミや弾性変位係数等の力学的性質の変化の解明
河上, 小川 (1965) ⁹⁾	シルト質ローム, 粘土, 砂と粘土の混合土	一軸と三軸, 同上 100,000	繰返し載荷時の挙動のモデル化とそれによる弾性係数, 降伏応力の求め方
Kawakami & Ogawa (1965) ¹⁰⁾	シルト質ローム, 粘土, 砂と粘土の混合土	一軸と三軸, 同上 10,000	繰返し載荷時の挙動のモデル化と弾性係数や軸ヒズミの変化の解明
山内, 羅 (196) ¹¹⁾	砂質ローム	一軸, 同上 3,000	繰返し載荷の荷重条件を土構造物の設計に直接的に取り入れる方法の確立
山内, 羅 (1965) ¹²⁾	砂質粘土ローム	三軸, 同上 6,000	上記 ¹¹⁾ の方法を三軸繰返し載荷試験に適用すること
Sangrey, Henkel & Esrig (1969) ¹³⁾	粘土	三軸, 同上 100	繰返し載荷条件下にある飽和粘土の有効応力の反応の解明
Glynn & Kirwan (1969) ¹⁴⁾	粘土	現地, 同上 1,000,000	繰返し載荷を受ける粘性土の応力へヒズミ関係に関するEyring理論の適用性の検討
Tanimoto & Nishi (1970) ¹⁵⁾	シルト質粘土, 砂	三軸, 同上 30,000	繰返し載荷条件下にある締固め土の弾性挙動の解明
Luo (1973) ¹⁶⁾	砂質ローム, 砂質粘土ローム	一軸と三軸, 同上 6,000	繰返し載荷を受けた土の特性を明らかにし現地の設計への応用
Brown, Lashine & Hyde (1975) ¹⁷⁾	シルト質粘土	三軸, 同上 1,000,000	繰返し載荷を受ける応力履歴の異なる粘性土の力学的性質の解明
Hyde & Brown (1976) ¹⁸⁾	シルト質粘土	三軸, 同上 1,000,000	繰返し載荷とクリープ条件下における塑性変形に関する関係の定量化
松井, 小原, 伊藤 (1977) ¹⁹⁾	粘土	三軸, 同上 50,000	繰返し載荷による飽和粘土の力学性(過剰間ゲキ水圧)変化の解明
France & Sangrey (1977) ²⁰⁾	粘土	三軸, 同上 100	繰返し載荷時に排水を伴う場合の粘土の反応に関するモデル化
柴田, Soelarno (1978) ²¹⁾	粘性土	三軸, 同上 (81)	繰返し載荷を受ける粘性土の応力・ヒズミ特性のモデル化と実験による検証
宮内 (1978) ²²⁾	粘土, シルト質ローム	半無限土層, 同上 100	繰返し載荷を受けた半無限土層内部の沈下と応力伝バ特性の解明
宮内 (1978) ²³⁾	粘土, シルト質ローム	半無限土層, 同上 100	上記 ²¹⁾ で得られた現象をレオロジーモデルによりエネルギー的に考察すること
宮内 (1978) ²⁴⁾	粘土, シルト質ローム	半無限土層, 同上 100	繰返し載荷時の休止時間が半無限土層内部の沈下現象に及ぼす影響の解明
宮内 (1978) ²⁵⁾	粘土, シルト質ローム	半無限土層, 同上 100	繰返し載荷を受けた半無限粘性土層内部のマクロな挙動とミクロな挙動の関連性の解明

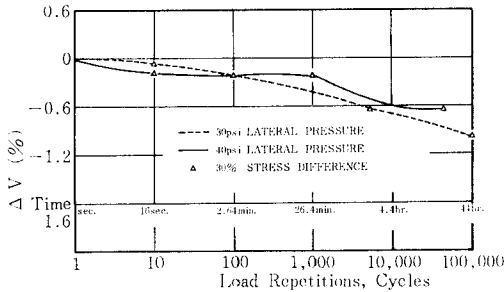
次に、繰返し周期が変形特性に及ぼす影響に関する実験の一例を示したのが図一2である。この図から、供試体成形後の静置時間の違いに拘わらず、周期が長くなるに従って軸ヒズミが減少し、載荷休止時間中にシキソトロピーによる強度回復の存在することがわかる。又、2

週間という静置時間中にも顕著な強度回復をすることがわかる。更には飽和度の影響を調べ、飽和度が63%, 71%の場合には、周期の影響がほとんど存在しないことを確認している。

最後に、載荷休止時間を一定に保って、荷重の持続時



図一 繰返し荷重下における試料の養生と応力荷重周期が変形に及ぼす影響 (シルト質粘土)

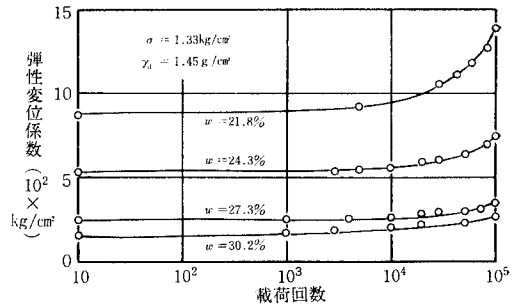


図一三 繰返し荷重に伴う容積変化の変動 (バインダー19%)

間を変化させた場合の変形特性についても研究し、荷重の持続時間が変形特性に及ぼす影響は一様ではなく、供試土によって異なることが報告されている。

Johnsonら⁷⁾は、締め固められた砂とシルトの混合土に繰返し荷重した場合の変形特性を、容積変化でとらえている。その一例を示したのが図一三である。この図から、繰返し荷重に伴う容積変化の傾向は、Seedら^{11)~5)}が報告している軸ヒズミに見られる傾向と定性的に類似していることがわかる。

河上ら^{8)~10)}は、風乾ロームを供試土として用いながら、主として含水比、荷重応力度、締め固め密度の影響の解明に主眼を置いて100,000回の繰返し荷重試験を行っている。その中で、Seedら^{11)~5)}の研究には見られなかった弾性変位係数なる概念を導入して結果を整理している。弾性変位係数は、ある荷重回数時の応力と弾性ヒズミ(荷重中の最大変位と除荷後の最小変化との差)との比で定義している。含水比をパラメータとした弾性変位係数と荷重回数との関係を図一四に示した。この図から含水比が低いと弾性変位係数が大きく、100,000回を越



図一四 荷重回数、含水比と弾性変位係数

えたときの増加率も顕著であることがわかる。ちなみにこの供試土の塑性限界を示すと、26.2%である。次に、締め固め密度一定の供試土で、繰返し応力度をパラメータとすると、弾性変位係数は繰返し応力度が小さいほど大きく、その値は荷重回数が10,000回を越えると急に増大する。しかし、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ことも報告している。

山内ら^{11), 12)}は、土構造物の設計に繰返し荷重の荷重条件を直接的に取り入れるることを、金属材料におけるMinerの考えを導入して試みている。すなわち、土供試体について、荷重強さとある一定のヒズミに到達するまでの繰返し荷重回数Nの関係を実験的に求める。そして、Nより小さい実際の繰返し荷重回数をnとして、ある一定の時間 t_0 における1つの予想荷重群によって与えられる $\sum(n/N)^a$ を計算する。そうすれば、この荷重群が繰返し加えられることによって、先の一定ヒズミに到達するまでの時間は、 $t_0 \times C / \sum(n/N)^a$ として予測できることを報告している。この報告の中で次の事も示している。繰返し荷重初期に相対的に小さい荷重強さを多数回繰り返すと、土の変形に対する抵抗の効果がより大きくなるので、Cの値は1.0よりも大きくなる。これに反し、相対的に初期に最大の荷重強さを多数回繰り返すと、土の変形に対する抵抗が減少するからCの値は1.0よりも小さくなる。この結果は、Seedら^{11)~5)}が導いた定性的結論に定量的表現を加えたことになるとしている。

Glynnら¹⁴⁾は、Eyringの理論を特殊化して、繰返し荷重を受ける粘土の変形に適用した。その結果、A.A.S.H.O.道路試験におけるわだち深さの測定値と理論値が、十分な一致を示したことを報告している。

Tanimotoら¹⁵⁾は、舗装の最適設計を日ごしながら路盤材料への繰返し荷重試験を、弾性ヒズミの変化に着目して行っている。結果の一例を図一五に示した。この図の上部から、含水比をパラメータとした場合には、弾性ヒズミが1~100回荷重の範囲で著しく変化し、その後徐々に減少するグループと、比較的小さい変動で、荷重

回数が増すに従ってヒズミがゆるやかに減少するグループに分離できる。これらの境界は、ほぼ最適含水比(17%)に対応していると考えられる。一方、同図下部に示した不カク乱土の挙動は、最適含水比以上で締め固められた供試土の曲線に類似しているが、変化幅は比較的小さい。この原因は、現地での交通による繰返し荷重を以前に受けていたことに一因があるとしている。一方、偏差応力0.51kg/cm²の場合には、外の場合に比較して大きな変化が生じている。これは、サンプリング深さの垂直応力が一般にこの値より小さかったことを意味している。

又、最適含水比(17%)と異なる含水比(13.1%, 22.2%)で締め固められた供試体では、繰返し載荷時の弾性軸ヒズミに30日間の静置時間の及ぼす影響が見られないのに対し、最適含水比付近(19.9%)で締め固めた場合には、その影響が顕著に現れることを報告している。更には、同じ締め固め力で得た供試体を30,000回繰返し載荷した時の弾性ヒズミは、最適含水比付近で締め固めた供試体に特に顕著に増加した。この原因は土壌構造変化にあるとしているが、その内容については触れていない。

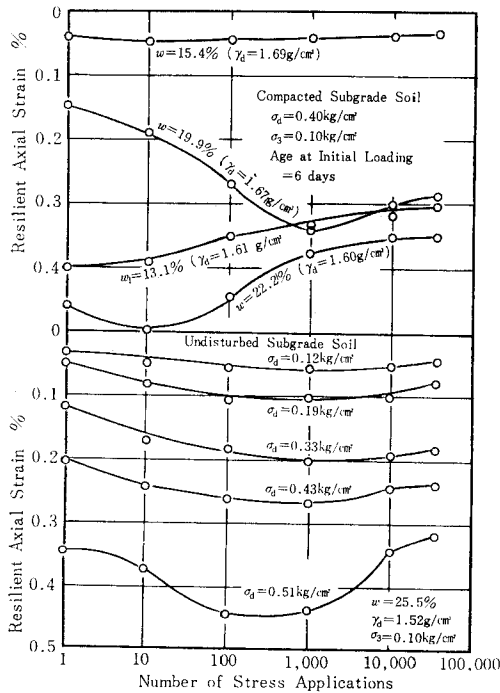


図-5 路盤材料の弾性特性に関する載荷回数の影響

Brownら¹⁷⁾は、過圧密比が2, 4, 10, 20の供試体で繰返し載荷試験を行って永久ヒズミを測定している。結果の一例を図-6に示した。この図から、10⁶載荷後

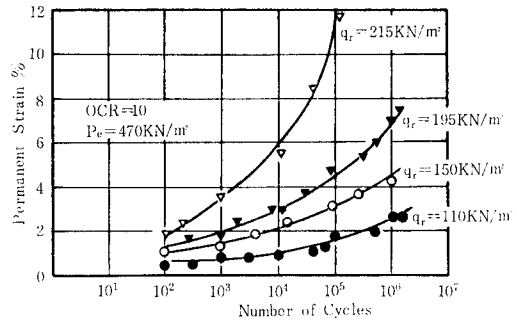


図-6 繰返し載荷試験中の永久ヒズミの増加 (OCR=10)

でさえ永久ヒズミが発生し続け、最高の応力レベル($q_u = 215 \text{ kN/m}^2$)の場合のみに破壊が発生していることがわかる。破壊が発生したのは、この場合も含めて3つの場合(OCRが4と10の各々最高応力レベル)のみである。以前の正規圧密土に関するLashin²⁷⁾(1971)の研究では、ヒズミ速度が増加し始める点を破壊と定義した場合、破壊が10⁶サイクル以内で発生しており、ずいぶん異なる現象であることを報告している。更には、載荷応力に匹敵する条件下で永久ヒズミを比較すると、繰返し載荷試験で得られた永久ヒズミは、単純載荷試験で得られたそれよりもかなり大きいとしている。

Hydeら¹⁸⁾は、過圧密比2, 4, 10, 20の供試体で繰返し載荷試験とクリープ試験を並行して行い、変形に関する定式化を試み、以下の方式で両者を関連づけられるとしている。

$$\log \dot{\epsilon} = \alpha - \lambda \log T$$

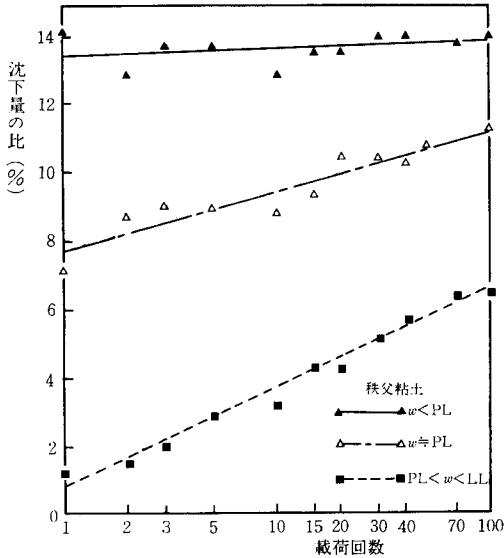
ここで $\dot{\epsilon}$ はヒズミ速度、Tは秒で表示した時間、 λ は $\log T$ に対する $\log \dot{\epsilon}$ のコウ配であり、同じ応力履歴をもつ供試体についてはクリープと繰返し載荷共一定で、クリープ試験から得ることができる。 α は載荷応力、応力履歴、載荷のタイプに依存するパラメータで、次式で得られる。

$$\alpha = B + C \cdot q$$

ここでBは物質と応力履歴に依存し、Cはコウ配で実験から求め、qは適用された偏差応力である。

宮内^{22)~25)}は、従来の研究が系全体(例えば三軸試験用供試体)に着目していたのに対し、半無限土層に繰返し載荷した場合の土層内部の沈下(残留ヒズミ)を、応力伝バも同時に実測しながら扱っている。結果の一例を図-7に示した。この図から、含水比がほぼ塑性限界以上の場合には、載荷回数を増すに従って次第に土層内部の沈下割合が増すのに対して、塑性限界以下の場合には直線のコウ配が極端に小さくなることわかる。更には、沈下領域と非沈下領域との境界線が、供試体成形荷重以

下の応力が伝バされる領域において、載荷回数を増すと従って次第に土層深部へと進行することを実験的に確認している。そして、同時に実測した伝バ応力が数回載荷まで減少し、その後ほぼ一定であることから、これらの沈下現象は応力伝バの面からは直接的には理解し得ず、レオロジーモデルを採用し、伝バ応力に基づくエネルギー面から考察すれば理解し得るとしている。

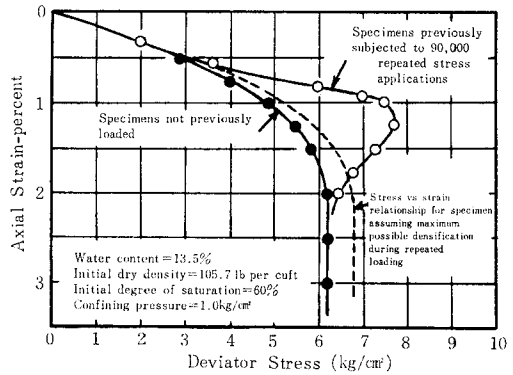


図一七 表面累積沈下量に対する5cm深さの累積沈下量の比と載荷回数との関係(0.5kg/cm²→3.0kg/cm²)

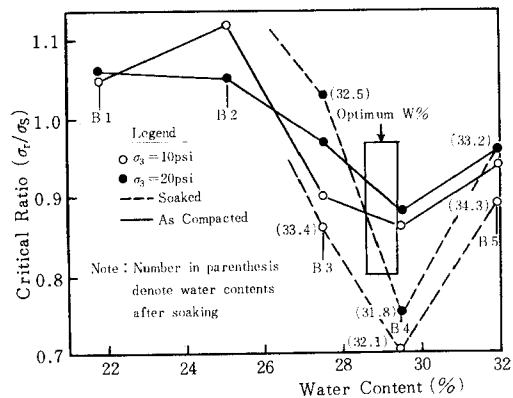
2. 強度特性

Seedら^{11,4)}は、繰返し載荷が強度特性に及ぼす影響に関する研究もやっている。その一例を図一八に示した。これは、以前に偏差応力3.65kg/cm²を9,000回加えた供試体と、以前に荷重を受けていない供試体との三軸試験結果を示したものである。この図から、後者が6.2kg/cm²の強度を有するのに対し、前者は7.75kg/cm²もの強度を有し、更には応力～ヒズミ曲線のコウ配も大きくなるのがわかる。この繰返し載荷による変化は、ヒズミが4%に達すると消滅することもわかる。このような強度増加は、繰返し載荷回数と、載荷中の軸方向圧縮が増すに従って大きくなった。しかし、飽和度が86%の場合には強度増加が認められなかったことも報告されている。

Larewら⁶⁾は、一定条件の供試体に偏差応力を変化させて、所定の回数繰返し載荷した場合の、累積軸変形量と載荷回数(普通目盛)との関係図において、曲線が上に凸から下に凸に移行する限界の偏差応力を、繰返し載荷時の強度と定義することを提案している。そして、



図一八 標準強度試験における応力～ヒズミ曲線の比較

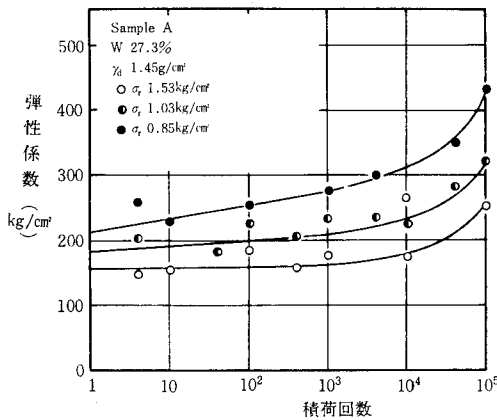


図一九 限界比, σ_r/σ_s 対含水比 (供試土B)

それと標準三軸試験の破壊時偏差応力(σ_s)との比を求め、含水比との関係の一例(粘土)を図一九に示した。この図から、供試体成形後の処理の違いに拘わらず、締め固め時の最適含水比付近で限界比が相当に減少していることがわかる。又、所定の含水比での限界比と乾燥密度との関係を求めてみると、含水比の違いに拘わらず乾燥密度が増すに従って、その値は有意な減少を示した。しかし、砂質粘土ではこのような変化を示さなかったことも報告されている。

河上ら^{8)~10)}は、繰返し載荷時の挙動を表すレオロジーモデルを選び、このモデルの性質に基づいて、繰返し応力を受けた後の圧縮応力とヒズミ速度との関係を示す曲線から、弾性係数を求める方法を提案している。その結果の一例を図一十に示した。この図から、弾性係数も先に示した弾性変位係数と同様に繰返し応力度が小さいほど、又、載荷回数が増すと従って大きくなるのがわかる。又、一軸圧縮強度は前もって載荷する繰返し応力度が高く、繰返し回数が多いほど高くなるSeedら^{11,4)}の結果と類似した結果を得たとしている。

Sangreyら¹³⁾は、繰返し載荷時の応力を有効応力で表示しながら、圧密履歴の異なる各供試土の繰返し載荷時

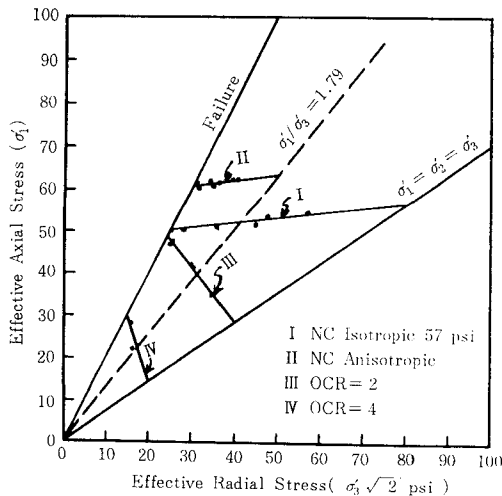


図一〇 載荷回数による弾性係数の変化

の限界水準の存在を確認している。その結果をまとめて示したのが図一十一である。この図の σ_1' は軸応力、 σ_3' は放射応力を示し、破壊包絡線と単純破壊試験の応力経路を表示する線とを結ぶ直線 I, II, III, IV を平衡線と呼んでいる。そして、破壊包絡線との交点に対応する軸応力が、繰返し載荷条件下で破壊へ導かない載荷応力の上限を表す。したがって、この応力レベル以上での繰返し載荷では必ず破壊が発生し、以下の場合には非破壊平衡が成立することになる。この応力レベルは、Larewら⁶⁾が述べている繰返し載荷の限界レベルと類似している。なお、I は 4 kg/cm² の等方圧下で正規圧密、II は有効主応力比 (σ_1'/σ_3') 1.79 で正規圧密、III と IV は 4 kg/cm² の等方圧下で圧密後、有効静水圧 2 kg/cm² と 1 kg/cm² で膨潤をした供試体の試験結果である。

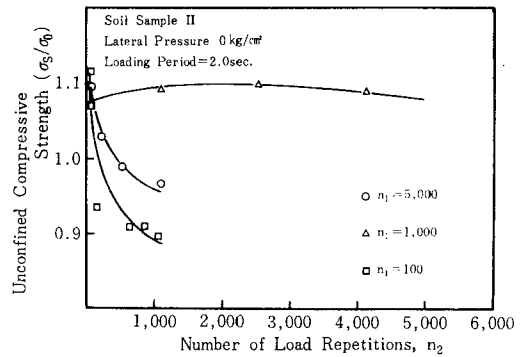
その後、ここで述べられている平衡線が排水によって位置移動することを Franceら²⁰⁾ が確認している。

Luo¹⁰⁾ は、繰返し載荷時の挙動には 3 つの過程が存在



図一十一 種々の圧密履歴に対する平衡線

すると仮定し、強度特性の面から検証している。その一例を図一十二に示した。この図は、まず繰返し応力 $\sigma_r = 0.75\sigma_0$ (σ_0 は載荷前の非拘束圧縮強度) を 100, 1,000, 5,000 回載荷した後、 $\sigma_r = 1.10\sigma_0$ を繰返し載荷した場合の、強度と 1.10 σ_0 載荷時の載荷回数との関係を示したものである。この図から、 $n_1 = 100$ の場合にはそれほど強度増加せず、 $n_1 = 1,000$ では硬化現象が顕著であるが、 $n_1 = 5,000$ となると $n_1 = 1,000$ で発生した硬化現象が消滅していることがわかる。更には、応力～ヒズミ関係においても、繰返し載荷回数の違いに拘わらず 3 つの過程が存在することを検証している。



図一十二 圧縮強度対混成応力下の繰返し載荷回数 n_2

Brownら¹⁷⁾ は、弾性係数は繰返し載荷に伴って減少し、10⁵ サイクル後はほぼ一定値になることを報告し、その減少傾向は過圧密比が大きくなるに従って顕著に見られなくなるとしている。そして、10⁵ サイクル後の弾性係数は、振動偏差応力と初期有効拘束応力との比の関数であるとしている。

松井ら¹⁹⁾ は、動的応力履歴を受ける飽和粘土の挙動は、飽和粘土のクリープ挙動と現象的に類似する点が多く、又、両者の本質的な機構が同じである可能性が指摘されるとしている。又、動態時に破壊が生じない場合、動的応力履歴を受けた飽和粘土の強度は、通常の圧密履歴の圧密・強度特性から近似的に推定できるとしている。

3. まとめ

以上で述べた研究成果は実験的研究であるが故に、その目的に応じて、供試土をはじめとする実験条件が異なる。しかし、繰返し載荷時の巨視的挙動を定性的に見ると共通点が幾点がある。そこで、それらをまとめると以下のごとくなる。

1) ヒズミ (永久変形) は繰返し載荷に伴って次第に増加し、定性的な現象においては静的なクリープ等の挙

動と類似している。

2) 載荷回数と軸方向圧縮が増すに従って、飽和度が60%程度の低い段階では顕著に強度増加する。

3) 繰返し載荷時の強度に関しては、破壊と平衡の限界レベルが存在する。

4) 繰返し載荷時の強度変化、応力～ヒズミ関係の変化等の挙動には3つの過程が存在する。

5) 繰返し載荷時の強度変化や弾性ヒズミ挙動には、応力履歴の影響が顕著に現れる。

6) 繰返し載荷時の弾性変位係数、弾性ヒズミ、限界比 (σ_r/σ_s)、層別沈下割合等の挙動は、塑性限界もしくは最適含水比を境にして変化し、これらの含水量において力学的転移点を示している。

7) シキソトロピー効果は飽和度95%の供試体、もしくは最適含水比付近で締め固めた供試体で、繰返し載荷時の軸ヒズミや弾性ヒズミ挙動に現れた。

8) 弾性変位係数や限界比 (σ_r/σ_s) は、乾燥密度の違いによっても変化する。

Ⅲ 微 視 的 挙 動

1. 有効応力と間ゲキ水圧

粘性土の動的間ゲキ水圧は、その測定上の困難性もあって数少ない研究例しか見当たらない。

Johansonら¹⁷⁾は、分類上では砂になる砂混合土で繰返し載荷時の間ゲキ水圧を測定している。その結果の一例として、サイクル当たりの間ゲキ水圧変化量と載荷回数との関係を図-13に示した。この図から、顕著な間ゲキ水圧の変化は最初の10回載荷程度までに発生し、その値は、拘束圧が小さく、応力差が大きいほど大きくなり、1個の例外を除いて10⁴サイクル前にゼロになっている。更には、間ゲキ水圧の大きさは初期の飽和度、混合量、試験前の初期容積変化、載荷された偏差応力によって変化することが示されている。

Sangreyら¹⁸⁾は、先述した平衡線(図-11)から推定

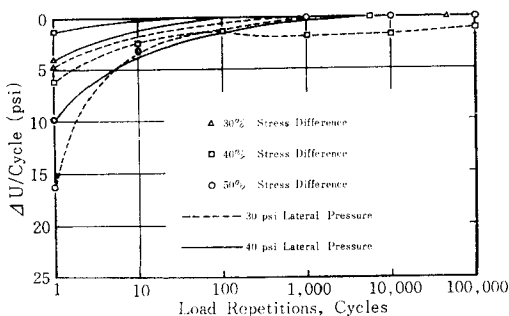


図-13 サイクル当たりの間ゲキ水圧変化、バインダー29%

し得ることはあるが、非破壊状態での平衡繰返し載荷時における、最大間ゲキ水圧と繰返し応力レベルとの間には直線関係の存在することを示している。

松井ら¹⁹⁾は、飽和粘土の動的挙動を有効応力の立場から解明するために、特に繰返し載荷により発生する過剰間ゲキ水圧に着目し、おおそ以下のことを明らかにしている。結果の一例として、過剰間ゲキ水圧 Δu と繰返し回数 N との関係を、セン断応力振幅 τ_a をパラメータとして図-14に示した。この図から、 τ_a の大小に拘わらず、載荷回数を増すに従って Δu は蓄積累加する傾向のあることが明らかである。これは柴田ら²⁰⁾も認めていることである。この蓄積累加傾向は τ_a が大きいほど顕著であり τ_a が0.52, 0.49 kg/cm² の場合には、10³ 載荷以前において破壊が生じていることもわかる。次に、同じセン断応力振幅に対する動態時過剰間ゲキ水圧は、同じ繰返し回数に対しては載荷速度が遅いほど、同じ載荷時間に対しては載荷速度が速いほど大きい値になることを示している。又、動態時過剰間ゲキ水圧の増加速度に関して、セン断応力振幅に動的上限降伏値と動的下限降伏値が存在する。この動的上限降伏値以上のセン断応力振幅で繰返し載荷すると、次第に有効応力が減少し破壊が生じ、この限界値以下では破壊に至らず、次第に平衡状態に移行する。動的下限降伏値以下では、動的応力履歴を受けても過剰間ゲキ水圧が発生しないことも報告している。更には、動態時の過剰間ゲキ水圧挙動は、次式によって近似的に推定できるとしている。

$$\Delta u = A e a \tau_a (t_1)^m \left(\frac{1}{1-m} \right) t^{(1-m)} + \text{constant} (m \neq 1)$$

但し、 Δu : 過剰間ゲキ水圧, $m \cdot a \cdot A$: 2種以上の τ_a に対する繰返し載荷試験から求め得る定数, t_1 : 単位時間, t : 時間

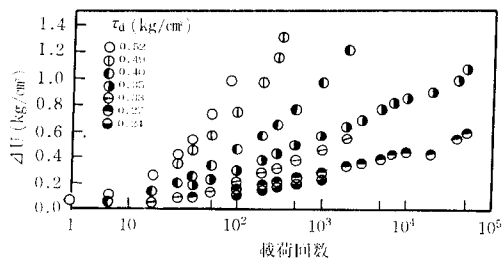


図-14 過剰間ゲキ水圧に及ぼすセン断応力振幅の影響

Franceら²⁰⁾は、先述の Sangreyら¹⁸⁾ の有効応力モデルと実験結果を基礎とし、繰返し載荷時に排水を伴う粘土の挙動の中で間ゲキ水圧を測定しながら、安定した繰返し載荷挙動の限界を示している。その中で、排水を伴う場合には、10~12回載荷以内で残留間ゲキ水圧はほとんどゼロ近くに減衰し、最大間ゲキ水圧はほぼ一定値に

減衰することを示している。又、5回載荷程度で80%以上の累積ヒズミと、70%以上の累積容積変化が生じることも示している。そして、プラスの残留間ゲキ水圧が生じる場合には、水分移動に伴い安定した繰返し載荷挙動の限界を示す平衡線が、より高い平均有効応力の位置へ移動し、マイナスの残留間ゲキ水圧が生じる場合には、その平衡線がより低い平均有効応力の位置へ移動することを示している。

2. 土壌構造とpF値

宮内²⁵⁾は、繰返し載荷時の微視的挙動を、実体顕微鏡観察とpF値の面から追究し、おおよそ以下のことを明らかにしている。図-15に繰返し載荷に伴うpF値の変化に関する実験結果を示した。この図から、繰返し載荷に伴って次第にpF値は低下する傾向のあることがわかる。一方、供試体成形期の荷重を変化させると、2.0~2.5kg/cm²載荷まではpF値が上昇し、それ以上に荷重が大きくなるとpF値が低下する実験結果を得ている。そこで、繰返し載荷時の乾燥密度変化幅を後者のそれと対比することによって、同一含水比、同一乾燥密度であっても、繰返し載荷時の場合にはpF値が減少過程、供試体形時には上昇過程にあることから、土一水系にも繰返し効果が現れることを示している。更には、実体顕微鏡写真から1~100×10⁻⁴cm²程度の微小間ゲキ分布を測定し、その加積曲線の75%間ゲキ面積とpF値の面から、モデル的にaggregateが構造変化することなく間ゲキ

を充填する圧縮型沈下と、aggregateの構造変化に起因する構造破壊型の沈下の境界になる間ゲキ面積の存在することを示している。

3. まとめ

繰返し載荷時の微視的挙動を定性的にまとめると次のごとくなる。

- 1) 繰返し載荷時の間ゲキ水圧挙動の顕著な変化は、10回載荷前後のごく初期に発生する。
- 2) 間ゲキ水圧は、載荷回数、拘束圧、載荷応力、載荷速度、セン断応力振幅、飽和度、容積変化の程度等に依存して変化する。
- 3) 過剰間ゲキ水圧挙動の面からも、繰返し載荷時に破壊しないで平衡状態を保つ限界値が存在する。又、残留間ゲキ水圧の存在形態によって、限界値を示す平衡線の位置が移動する。
- 4) pF値から見た土一水系の状態にも、密度の変化に由来しない繰返し効果が存在する。

IV 巨視的挙動と微視的挙動の関連

Seedら⁴⁾は、繰返し載荷に伴って強度と応力~ヒズミ曲線のコウ配が増加する硬化現象に関し、次のような考察を加えている。

第1の要因として、繰返し載荷に伴う密度の増加の影響を取り上げ、実験的に検証している。その結果、密度の増加が硬化現象に影響を及ぼしてはいるが、それがすべてではないことを明らかにしている。第2の要因として、拘束圧を長期間一定に保っておくことの影響を取り上げ、やはり実験的に検証している。その結果、低ヒズミ領域ではその効果が現れるが、高ヒズミ領域になるに従ってその効果がなくなることを示している。上記の2要因だけでは硬化現象を説明しきれない。そこで、繰返し載荷中の水分分布の微視的变化、シキソトロビー、土粒子の再配列が相互に関連しながら硬化現象に関与しているものと推察している。

河上ら^{8),9)}は、繰返し載荷による密度の増加がごく初期で起こるのに対し、弾性変位係数等に見られる硬化現象は10,000回載荷程度で顕著に見られることから、硬化現象が単なる密度の増加に起因するものではないとしている。硬化現象の主因はLambe^{32),33)}の主張する、土粒子間に働く電位エネルギーや、土粒子の配列の変化等に基づくものであろうとしている。

宮内²⁵⁾は、半無限土層へ繰返し載荷した場合の土層内部の沈下の進行現象を、巨視的には粘弾性的な立場から考察している。そして、同一含水比、同一乾燥密度の供試体における微視的な土一水系の状態をpF値の面から実験的にとらえ、繰返し載荷を受けると低pF領域へ顕著に状態変化することを明らかにしている。そこで沈下

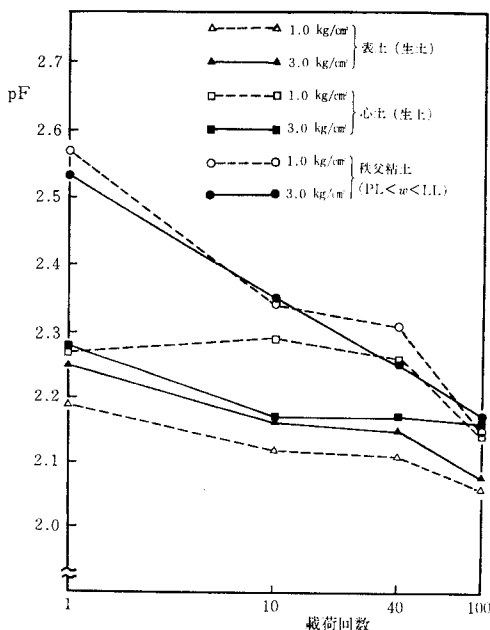


図-15 pFと載荷回数との関係

領域、並びに沈下領域近くの非沈下領域においても、微視的にも遅延弾性変形を繰り返しており、それによってより顕著に構造変化が進行し、これが繰返し載荷時の沈下の進行現象の微視的内容であるとしている。

これらの研究成果から、巨視的挙動に見られる繰返し効果が、微視的に見た場合、単に密度の増加に伴う土粒子の接近のみ起因しているものでないことが明らかであろう。それ以外の原因としては、 pF 値の変化から推察し得るごとく、土壤構造の変化も含めた土-水系の状態変化が考えられる。しかし、この点に関しては未だ推察の域から脱し得ない。

以上に示したごとく、現時点における繰返し載荷時の巨視的挙動と微視的挙動の関連付けはまだ不十分である。微視的な物現的内容を明確化し、両者の関連付けをすることは、今後の課題といっても過言ではないと考える。

従来から、巨視的挙動の微視的な物理的意味については、その挙動を説明し得る土壤モデルを考え、それに頼るのが一般的であった。しかし、この方法は微視的な土壤構造の実態を十分に考慮しておらず、不備と考えられる。

最近では、電子顕微鏡をはじめとした高度な技術が土壤構造の研究にも取り入れられるようになり、急速の進歩を遂げつつある。そうした中で、嘉門^{28), 29)}が、粘性土の構造のは握と表現方法、並びに変形・強度特性と土壤構造との関連に関する取りまとめを行っている。その中で、圧密のような静的な荷重を受けた粘性土の力学的挙動と微視的構造変化の関係においてさえ、未だ統一的理解をするには至っていないことを示すと共に、土質力学全般について、微視的構造の定量的モデル化の必要性を説いている。

モデル化にあたっては、ラリオノフの分類³⁰⁾による超ミクロ構造からマクロ構造に渡る広い範囲で、3相に着目しながらその実態をは握し、それに即した形で行うことが大切であろう。この点に関し、現状の電子顕微鏡観察においては、50倍程度の低倍率の場合には水分を氷結状態で観察することが可能である³¹⁾が、それ以上の倍率の場合には固相部分の観察しかできない欠点がある。この点に関する技術開発をはじめとして、土壤構造の統一的な評価方法の確立に関しては、今後の研究を待たねばならない。

Seed⁴⁾ や河上^{8), 9)} が、硬化現象を考察する過程で引用している Lambe の研究^{32), 33)} は、無機性粘性土を板状体でモデル化し、コロイド化学と結晶化学的手法で土壤構造を論じ、吸着水や締固めに伴う配向配列化についても言及しているものである。

その後の研究で、粘性土においては土粒子が単体とし

ては挙動せず、ある数の土粒子が集合した集合体が単体になることが報告され、認められている²⁹⁾。その単位については、研究者によって $peds^{28), 29)}$ 、 $aggregate^{25)}$ 、 $行動単位^{34)}$ 等の種々の名称が与えられ、その内容についても統一の見解は得られていない。今後、土壤構造の実態をとらえモデル化する場合には、これらの土粒子が集合した単位の組成的内容や挙動形式を分類し、明確化することも是非必要であると考え。又、これらの土壤構造を繰返し載荷との関連で追究する場合には、載荷後だけではなく、載荷時の圧縮過程と除荷時の回復過程を分離して、動態的な構造変化をとらえることができれば、その物理的意味をより明確にし得ると考える。

巨視的挙動に関しては、各種実験条件下での定性的挙動特性がほぼ明らかになっている。今後は、試験法の確立と、すべての条件を包含した形での定量化の方向へ研究を進める必要がある。

V あ と が き

繰返し載荷による粘性土の挙動に関する研究の発展過程と現状を概観した。その結果、巨視的挙動に見られる繰返し効果の微視的な物理的内容を明確化することが、今後の主要な課題であることが明らかとなった。

研究結果を示す過程で、主として各研究の実験条件が異なるために、ラ列的にならざるを得なかった。もう少し工夫する余地があったのではないかと反省している。

最後に本拙論を取りまとめるに当たり、何かとご援助下さった愛媛大学の中村忠春先生と、図表等の整理にご協力下さった井上桂子嬢に深謝の意を表します。

引用文献

- 1) Seed, H.B., Chan, C.K. & Monismith, C.L.: Effects of Repeated Loading on the Strength and Deformation of Compacted Clay, Proc. Highway Research Board, Vol. 34, pp. 541~558 (1955)
- 2) Seed, H.B. & McNeill, R.L.: Soil Deformations in Normal Compression and Repeated Loading Tests, Highway Research Bulletin, Vol. 141, pp. 44~53 (1956)
- 3) Seed, H.B. & Chan, C.K.: Effect of Stress History and Frequency of Stress Application on Deformation of Clay Subgrades under Repeated Loading, Proc. Highway Research Board, Vol. 37, pp. 555~575 (1958)
- 4) Seed, H.B., McNeill, R.L. & Guenin, J. de: Increased Resistance to Deformation of Clay Caused by Repeated Loading, Proc. A. S. C. E., SM2, pp. 1645-1~28 (1958)
- 5) Seed, H.B. & Chan, C.K.: Effect of Duration of Stress Application on Soil Deformation under Repeated Loading, Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Vol.

- 1, pp.341~345 (1961)
- 6) Larew, H.G. & Leonards, G.A. : A Strength Criterion for Repeated Loads, Highway Research Board, Vol. 41, pp.529~556 (1962)
- 7) Johnson, R.W. & Yoder, E.J. : Pore Pressure and Strength Characteristics of Sand-Soil Mixtures under Repeated Dynamic Loads, Proc. 2nd Asian Regional Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., pp.141~151 (1963)
- 8) 河上房義, 小川正二 : くり返し応力を受けた締固め土の力学的性質, 土木論集, No. 96, pp.8~14 (1963)
- 9) 河上房義, 小川正二 : くり返し応力を受けた締固め土の弾性係数および降伏応力について, 土木論集, No. 114, pp. 8~16 (1965)
- 10) Kawakami, F. & Ogawa, S. : Strength and Deformation of Compacted Soil Subjected to Repeated Stress Applications, Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., Vol. 1, pp.264~268 (1965)
- 11) 山内豊聰, 羅文鶴 : 土供試体に対する繰返し荷重条件と変形を関係づける方法, 土と基礎, Vol. 13, No. 8, pp.21~25 (1965)
- 12) 山内豊聰, 羅文鶴 : 三軸的繰返し荷重を受ける土の荷重と変形の関係, 土と基礎, Vol. 13, No. 11, pp.17~21 (1965)
- 13) Sangrey, D.A., Henkel, D.J. & Esrig, M.I. : The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp.241~252 (1969)
- 14) Glynn, T.E. & Kirwan, R.W. : A Stress-Strain Relationship for Clays Subjected to Repeated Loading, Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. Found., Engrg., Vol. 1, pp.159~163 (1969)
- 15) Tanimoto, K. & Nishi, M. : On Resilience Characteristics of Some Soils under Repeated Loading, Soils and Foundations, Vol. 10, No. 1, pp.75~92 (1970)
- 16) Luo, W-K. : The Characteristics of Soils Subjected to Repeated Loads and their Applications to Engineering Practice, Soils and Foundations, Vol. 13, No. 1, pp.11~27 (1973)
- 17) Brown, S.F., Lashine, A.K.F. & Hyde, A.F.L. : Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp.95~114 (1975)
- 18) Hyde, A.F.L. & Brown, S.F. : The Plastic Deformation of a Silty Clay under Creep and Repeated Loading, Geotechnique, Vol. 26, No. 1, pp.173~184 (1976)
- 19) 松井保, 小原秀夫, 伊藤富雄 : 飽和粘土の力学的特性に及ぼす動的応力履歴の影響, 土木論集, No.257, pp.41~51 (1977)
- 20) France, J.W. and Sangrey, D.A. : Effects of Drainage in Repeated Loading, Proc. A. S. C. E., GT7, pp.769~785 (1977)
- 21) 柴田徹, Soelarno, D.S. : 繰返し載荷を受ける粘性土の応力・ひずみ特性, 土木論集, No.276, pp.101~110 (1978)
- 22) 宮内定基 : 繰返し載荷時の沈下現象と応力伝達について——半無限粘性土層への繰返し載荷に関する基礎的研究(I)——, 農土論集, No.76, pp.76~82 (1978)
- 23) 宮内定基 : 繰返し載荷時の沈下現象に関するレオロジー的考察——半無限粘性土層への繰返し載荷に関する基礎的研究(II)——, 農土論集, No.77, pp.32~38 (1978)
- 24) 宮内定基 : 繰返し載荷時の休止時間が沈下現象に及ぼす影響について——半無限粘性土層への繰返し載荷に関する基礎的研究(III)——, 農土論集, No.78, pp.40~44 (1978)
- 25) 宮内定基 : 繰返し載荷による粘性土の挙動とその工学的性質に関する研究——主として沈下の進行現象について——, 学位論文, 東京大学 (1978)
- 26) 石原研而 : 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.91~92, 115 (1976)
- 27) Lashine, A.K. : Some Aspects of the Characteristics of Keuper Marl under Repeated Loading, Ph.D. Thesis, University of Nottingham, (1971)
- 28) 嘉門雅史 : 粘性土の構造と力学的特性, 土壌の物理性, No.35, pp.21~28 (1977)
- 29) 嘉門雅史 : 土の構成式に関する現況総括 2. 粘性土の微視的構造について, 土質工學論文報告集, Vol.18, No.2, pp. 73~79 (1978)
- 30) アー.カー.ラリオノフ著・松尾新一郎訳 : 土の構造, 山海堂, pp.15~16 (1973)
- 31) 中村忠春, 宮内定基 : シラス地帯における土の特性と水の動態, VII.土の構造と水分保有形態, 農土学会大会講演要旨集, pp.220~221 (1979)
- 32) Lambe, T.W. : The Structure of Compacted Clay, Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM2, pp.1654-1~34 (1958)
- 33) Lambe, T.W. : The Engineering Behavior of Compacted Clay, Jour. Soil Mech. Div. ASCE, Vol. 84, SM2, pp.1655-1~35 (1958)
- 34) 堤聰, 足立忠司, 竹中肇 : 乾燥条件からみた有機質土の理工学的性質の変化——とくにコンシステンシーおよび水分保持特性について——, 農土論集, No.71, pp.8~15 (1977)

[1979. 7. 21. 受稿]