

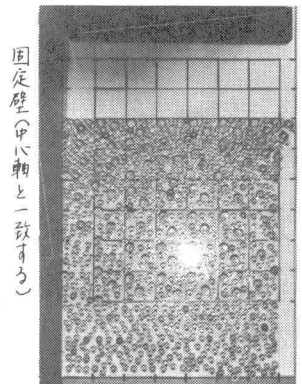
九州大学工学部 正 員 山内豊聡
同 大学院 学生員 ○青砥 宏

1. まえがき

近来、粒状体のせん断特性を微視的に、すなわち粒子のスケールで論議し、統計的手法を用いて粒状体の状態を定量的に表示しようとする試みがなされている。例えば最上¹⁾は、粒状体の間ゲキ比について標準偏差と破壊との関係を述べ、統計的概念によって粒状体の状態を表示している。また村山²⁾は、粒状体中のある点の応力と粒子の接触角から粒状体の変形特性を述べている。筆者ら³⁾は、主としてマサエのような砂質ローム土の繰返し変形ならびにクリープ変形過程において初期圧縮変形過程を定義し、その変形機構を想定したが、初期圧縮変形過程は次の一定応力、一定ヒズミ速度、一定体積の変形を生じる定常過程に滑らかに連続しなければならない。この2つの過程の連続性を考えるに当り、その変形が土中の間ゲキ比の不均一性によるものと考え、間ゲキ比と粒子の移動方向が直接的な関係を持つと考えた。さらに村山⁴⁾によれば、粒子の移動方向とその点の応力とは、2次元モデルにおいてではあるが関係づけられている。応力～間ゲキ比～粒子の移動方向の関係に時間依存性をとり入れるならば、土の繰返し変形ならびにクリープ変形における初期圧縮変形過程と定常過程との連続性を検討できるであろう。そして応力と時間の関係を知ることは、静的強度(ヒズミ速度一定試験)と一定荷重試験の関係をj知る上で必要不可欠のことと考えられる。今回は初期圧縮変形過程と定常過程との連続性を検討するために2次元試験を行った。2次元を3次元に拡張することは非常に困難な問題を多く含んでいる。それらの1つは、粒子の移動方向であり、さらに移動距離であろう。すなわち、2次元モデルにおいては粒子のつめ込み方と応力の方向によってある平面内に定められている。一方、3次元においては粒子は奥行方向にも移動するし、移動に要するエネルギーがより小さい移動径路も考えられる。微小部分の粒子の移動についてのみ考えるならば、2次元モデルにおける粒子の動きは最もエネルギーを多く消費する径路をたどると思われる。また、同じく微小部分において、全ての粒子が同時に動くとも考えるのも問題点を残すと思われる。以上より2次元を3次元に拡張することは、未知な点が多いが、3次元問題を解決する1つのアプローチとして2次元試験を行うことによって有力な手がかりが得られるだろう。

2. 実験方法

2次元モデルの実験ではあるが、モデル化した実験装置によって荷重一定試験を行うことは非常に困難である。そこで変形に際してヒズミ速度依存性の小さい材料、すなわち十分大きく十分重い材料を用いた。材料としては鉄製の大きさの異なる3種類のナットを用い、それらを平面上にならべて一方向から圧縮変位を与えた。なお中心軸上の粒子は側方変位を平均的に拘束されるものと考え、載荷版下の片側のみを想定して片



固定壁・中心軸と一致する

写真-1

側拘束試験とした(写真-1参照)。

時間依存の変形における粒子の動きを調べる手段として、時間依存性の小さい材料の二次元圧縮試験を行ったのは次の理由によるものである。(1) 時間に依存する材料においても、また時間依存性の小さい材料においても、変形は粒子の動きと直接的な関係を持つと考えられる。よって、時間依存性の小さい材料における変形と粒子の動きの関係から、定性的にはあるが、時間依存性の大きな材料におけるそれらの関係を類推できる。(2) 時間依存性の小さい材料を用いれば、任意の変位を与えることによって粒子の動きを追うことができる。すなわち、2つの材料の粒子の動きはほぼ似たようなものであろうと思われるからである。

3. 実験結果とその考察

実験結果は今までいく人かによって行なわれた粒体の二次元圧縮試験の結果とほぼ一致するものであるが、本文では初期圧縮変形過程と定常過程の連続性の面から、主として粒子の移動方向に注目して考察を加えた。

3-1 粒子の移動方向の頻度分布

初期圧縮変形過程と定常過程の粒子の移動方向の頻度分布を示すのが図-1である。図中の θ は主軸と粒子の移動方向とのなす角である。圧縮中、軸変位が0~4cmの範囲では側方変位はほとんど生じない。すなわち、軸変位0~4cmが初期圧縮変形過程に相当し、それ以後は定常過程である。図-1で明らかなように、頻度曲線の形状は、軸変位0~4cmでは次第に急になり4cmで最も急になる。その後定常過程にはいると逆に頻度曲線の形状はゆるやかになって行く。標準偏差 $\{\overline{(\Delta\theta)^2}\}^{1/2}$ は最初大きく、軸変位4cmで最小となったのち、ふたたび次第に大きくなることは言うまでもない。

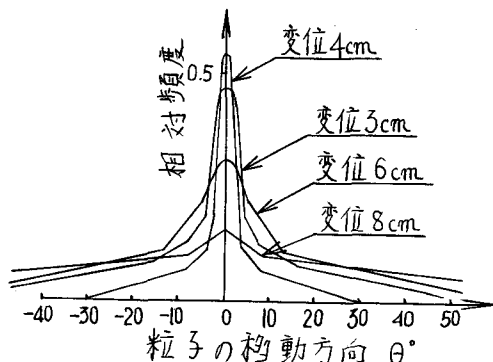


図-1 粒子の移動方向の頻度分布

3-2 粒子密度の頻度分布

図-2は各軸変位ごとの粒子密度の頻度分布を示したものであるが、図より明らかなように、軸変位0~4cmでは頻度曲線は次第に急になり、最頻密度も増大し、その点における相対頻度も増加する。4cmを越えると逆に曲線はゆるやかになり、最頻密度に対応する相対頻度も減少する。この事実は最上による実験結果とよく一致する。また粒子の移動方向の頻度分布とも非常によい一致を示している。図-1、図-2より粒子密度と粒子の移動方向とは深い関係にあり、粒子は間隔濃度をより一様化する方向に動くことがわかる。初期圧縮変形過程において粒子密度の場所的分布が生じるのは、応力により粒子密度の偏りを強制されるからにほかならない。いすれにしても、粒子の移動方向ならば粒子密度は応力の大きさと方向とに深い関係を持つ

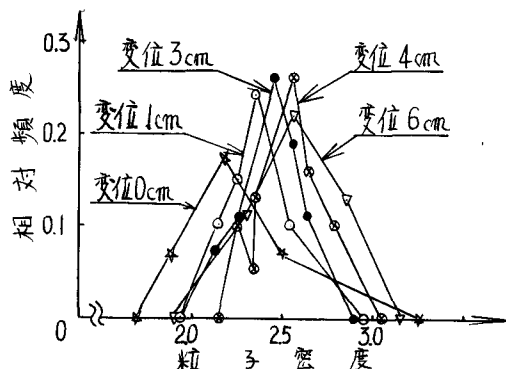


図-2 粒子密度の頻度分布

ている。

3-3 粒子の移動方向ならびに粒子密度の場所的分布

粒子の移動方向と粒子密度の関係

は、頻度分布曲線の変化状況などにより非常に密接であることがわかったが、両者の場所的分布を一例を引いて示すことにする。両者の関係は図-3に示されるように頻度分布同様に密接な関係にある。例えば、載荷面近くでは粒子密度は高く、粒子の移動方向は軸方向($\theta = 0^\circ$)に一致している。この傾向は軸変位の大きさには無関係である。すなわち、側方変位に寄与する領域は非常に限られた領域である。そして、その領域が定常過程の変形に寄与するものであろう。

3-4 粒子密度の頻度分布と体積変化の関係

次に粒子密度の最頻値における相対頻度の変化と体積変化の関係を考えてみる。図-4は両者の関係を示したものであるが、相対頻度のかわりに標準偏差を考えると同様であり、また粒子密度のかわりに

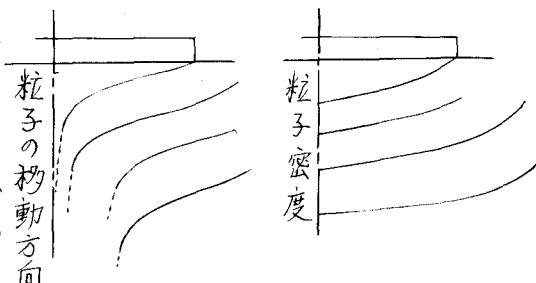


図-3 粒子の移動方向ならびに粒子密度の場所的分布の概略図

粒子の移動方向を考えると同様の傾向が得られる。図-4においてA, B, C, C', D, E, F, G, G'に相当するものが各々a, b, c, c', d, e, f, g, g'である。A, B, C, C'はゆるい土の場合であり、A~Cが初期圧縮変形過程に相当し、C'以後が定常過程に相当する。C~C'は両過程の遷移領域であらう。同様にD, E, F, G, G'が密な土の場合である。ゆるい土の場合は、静的試験においても荷重一定試験においても同様な径路をとるのであろうが、密な土の場合は、荷重一定試験においては初期圧縮変形過程は存在しないと思われる。

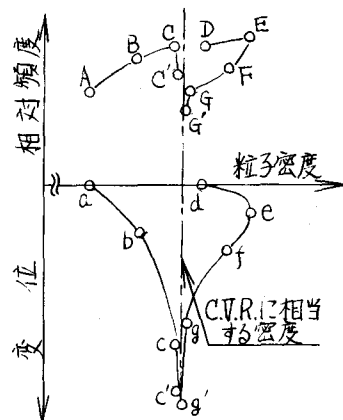


図-4 粒子密度の頻度分布と体積変化の関係

4. 初期圧縮変形過程と定常過程の連続性について

以上に述べた粒子の移動方向と粒子密度ならびに体積変化によって初期圧縮変形過程と定常過程の連続性を考えてみる。初期圧縮変形過程は第1報で示したように、間ゲキが載荷面付近の間ゲキ濃度に比例する確率で放出される過程であった。そして基本的には応力の向きと逆方向に間ゲキが流れると考えた。この過程におけるヒズミ、ヒズミ速度は次式で示される。

$$\dot{\epsilon} = A(KF_0/\epsilon_0) [\exp(\epsilon_0^2 t/K) \operatorname{erfc}(\epsilon_0 \sqrt{t}/\sqrt{K}) + 2\epsilon_0 \sqrt{t}/\sqrt{\pi K} - 1] + \epsilon. \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A\epsilon_0 F_0 \exp(\epsilon_0^2 t/K) \operatorname{erfc}(\epsilon_0 \sqrt{t}/\sqrt{K}) \quad (2)$$

ここで、A, ϵ_0 : 定数, K: 拡散係数, F_0 : 初期間ゲキ濃度, t : 時間, ϵ : 軸ヒズミ, $\dot{\epsilon}$: 軸ヒズミ速度である。(1), (2)式によれば、 ϵ が十分大きくなれば(初期圧縮変形過程の最終段階)載荷面付近の間ゲキ濃度の変化は拘束され、つまり載荷面付近に不動域が現われる。これは土の密度の限界によるものであるが、図-1, 図-2, 図-3の結果とよく一致している。初期圧縮変形過程の終了時には間ゲキの放出は拘束されてしまうので、それ以後の変形は等体積形になることが考えられる。これはゆるい土の場合の定常過程が等体積変形過程であることと一致している。また、変形中の粒子

の移動方向ならびに粒子密度の変化については、(1), (2) 式と実験値はほぼ一致するようである。

図-5は供試体を例にとって変形過程を示したものである。最初粒子密度が一様分布している供試体に偏差応力 σ がかかると、時刻 t_1 において載荷面付近の粒子密度が増加する。さらに時刻 t_2 において載荷面付近に不動域が発生する。これらの過程はいずれも式(1), (2)によって示されるとおりである。ここまでは初期圧縮変形過程であり側方変位は生じない。さらに時間が経過すると、間ゲキの放出が拘束されたまま、すなわち、等体積変形を生じ側方に張り出す。

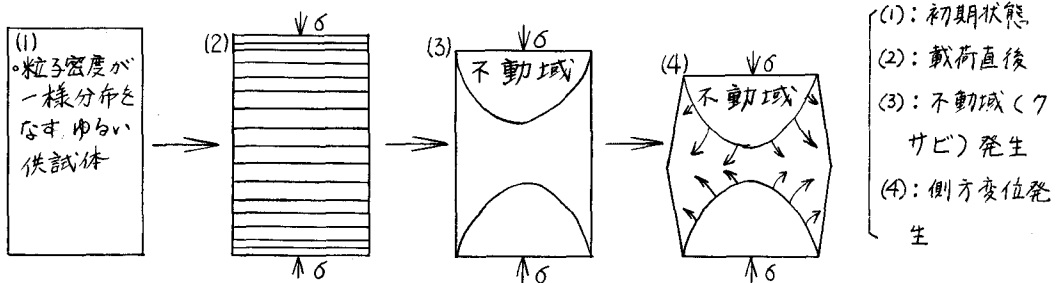


図-5 供試体における両過程の変形状態。

5. 結 論

以上のことを要約すれば次のようになる。

(i) 粒子の移動方向と粒子密度は、頻度分布の変化ならびに場所的分布の点で密接な関係がある。つまり変形過程の中で粒子は粒子密度の小さい方向へ移動する傾向にある。これは3次元においても同様であろう。これは大きな間ゲキの方向に粒子が常に動くというのではなく、ある変形の後に大きな間ゲキは小さいもの以上に消滅する確率が大いという程度であるということである。

(ii) (1), (2) 式より初期圧縮変形過程の終了時には間ゲキの放出が拘束されるが、この事実は定常過程の条件の一つである等体積変形を説明するものである。よってこの点に関しては両過程は連続的に遷移すると言えよう。

今回は、粒子の移動方向、粒子密度、体積変化の点から初期圧縮変形過程の検定を行ったが、次回は静的強度との関連および応力履歴の点から応力依存性について述べたい。

参 考 文 献

- 1) 最上武雄：「粒状体の力学」土質力学第8章にまとまっている。
- 2) 山内豊聡、青砥 宏：「土の初期圧縮変形機構について」土質工学研究発表会講演集，昭. 45. 6.
- 3) 村山朔郎、松岡 元：「粒状体のせん断現象の微視的考察」土木学会年次学術講演会講演集，3，昭. 44. 10.
- 4) 村山朔郎、松岡 元：「粒状土のせん断機構に関する微視的考察」土質工学研究発表会講演集，昭. 45. 6.