

1. はじめに I¹の様に地盤材料の構成モデルの定式化に当り、弾塑性体として扱えられる事が多い。しかし実験の進歩と共に、弾塑性体としての定式化では、その表現が難しい現象が報告されている。本報告はこの様な現状を考へ、地盤材料の可能な微視的プロセスの考察に基づいて、二つの非弾性成分を有する構成モデルの定式化を与える。又、ある現象を表現するのには、種々の定式化が考えられる事を示す。最後に二つの非弾性成分を有する構成モデルの特徴(長所)について述べる。

2. 地盤材料の微視的変形プロセス 地盤材料の微視的変形プロセスは多結晶体金属(ここでは延性的変形形態を考へる。)と異なり、少くとも二つの微視的メカニズムが非弾性変形に寄与するモデルを考へる事の妥当性を示す。議論の中心は、砂の様な粒状材料と岩質材料とを考へる。

まず、多結晶体金属の単結晶の変形のメカニズムを考へる。(Asaro¹⁾(1981), Havner²⁾(1981)) 微視的変形メカニズムは、ある結晶面に沿つてのすべり(より、微視的には転位運動)が塑性変形 $\dot{\epsilon}^p$ をもたらし、応力変化に関連する格子の変形 $\dot{\epsilon}^g$ をもたらし、 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^g + \dot{\epsilon}^p$ である。この時、弾性的性質は塑性変形に影響されない、良い精度で、近似できる。この様に、多結晶体金属の微視的変形プロセスは、弾塑性体としてのモデル化の基本的仮定と、微視的な変形プロセスは一致する。

砂の様な粒状材料の変形メカニズムを考へると、ある安定な状態から、外荷重の増加が、ある時、粒子間力を伝達する特殊な構造(粒、あるいは鎖と呼ばれている。以下、構造と記す)が、構造自身の変化あるいは新たな構築、増減等により変化し、最大圧縮方向へ偏向した構造となる。このため構造変化によりもたらされる変形は必ずしも異方的性質を有する様になる。又、瞬間的には、新たな構造が形成されるまで、粒状体内部は乱れた状態であるから、粒子の相対的变化に基づくすべり変形が生ずると考へる。実際にこの様なメカニズムで粒状体の変形が生じていると主張する訳ではなく、粒状体の広範な変形現象の記述に可能な仮説的モデルである。この様なメカニズムを考へると、砂の様な粒状体の非弾性変形は構造変化とすべりの二つのメカニズムに支配される事になる。全変形に対する二つのメカニズムの相対的寄与は、粒子の性質、密度、履歴、応力経路により大きく変化するものと考へられる。又、構造変化により、弾性的性質も、応力履歴の影響を受ける事になり、弾性的性質の不変性は成立しない。

岩の様な材料では、微視的には、弾性定数の変化ともなうマイクロクラッキングの進展、スビクラック面に沿うすべり変形と二つの基本的変形プロセスとを考へる事ができる。(例として、Bazant & Kim³⁾(1979), Horii & Nemat-Nasser⁴⁾(1986)) このうち、どちらが優勢であるかは、拘束圧の程度、温度その他に影響される。マイクロクラックの発生は、異方的であるから、弾性定数も異方的になる。(例として Horii & Nemat-Nasser⁵⁾(1983))

一般に地盤材料では、金属材料と比較すれば、内部に至る応力で伝達する構造は脆弱であり、外力、過去の履歴に応じて変化するものと考へる方が自然である。この事は微小すべり時の弾性定数・拘束圧依存性とも見ても明らかである。この様に、地盤材料の非弾性成分を生ずるメカニズムとしての様に扱えても、変形をもし、弾性成分と非弾性成分と分離した時、弾性的性質が非弾性変形の影響を受ける事は必然的な事に様に思われる。3節では、まず、構造変化とすべりの二つのメカニズムを想定した構成モデルの一般的定式化を示し、それを簡略化する形でここに提すための構成モデルを紹介する。

3. 構成モデルの定式化 構造変化とすべりの両者のメカニズムが、砂の様な粒状体の非弾性変形に寄与し、すべり変形は構造変化に影響を与え、構造変化はすべり変形に影響するものとして、速度型構成モデルが Tobita⁶⁾(1987)により与えられている。その結果のみを示すと、

$$\dot{\epsilon}_{ij} = C_{ijkl} \dot{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

$$C_{ijkl} = C_{ijkl}^* - \frac{1}{H_c^f} (\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}) [(\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}}) - N_{kl}]$$

ここに $N_{kl} = (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{mn}}) A_{mnst}^{f(a)} (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{st}}) (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}})$

$$H_c^p = (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{mn}}) B_{mnst}^{p(b)} (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{st}})$$

$$C_{ijkl}^* = C_{ijkl} + C_{ijkl}^f$$

$$C_{ijkl}^f = -(\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}}) (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}}) / H_c^f$$

$$H_c^f = (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}}) A_{ijkl}^{f(a)} (\frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{kl}})$$

ここに, ξ^f, ξ^p : 構造変化と可変りに関する内部変数,
 g, f : 塑性ポテンシャル及び負荷関数, ϕ, ϕ : 構造変化に
 関するポテンシャル及び負荷関数, H_c^f, H_c^p : 構造変化に関する
 係数等である。(詳細は 6 参照) 典型的な応力-ひずみ曲線を
 図1(a)に示す。(1)式の定式化において, 構造変化と弾性変形と
 まとめて, あるポテンシャル $W(\sigma_{ij}, \phi_{ij})$ により決定する事が
 できると仮定すると, 速度形成では,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\partial^2 W}{\partial \sigma_{ij} \partial \sigma_{kl}} \dot{\sigma}_{kl} + \frac{\partial^2 W}{\partial \sigma_{ij} \partial \phi_{kl}} \dot{\phi}_{kl} \quad (2)$$

と記述できる。(Dragon & Mroz (1979)⁷⁾) この時, 載荷過程と
 降荷過程の挙動は密接に関連した事になる。(図1(b)参照)

岩質材料において, マイクロクラッキングが支配的である場合,
 $\dot{\xi}^p \approx 0$ とできるから, (2)式のみで変形が記述できる。この様な
 モデルを 破壊性材料と呼ぶ。(Dougill & Rida (1980)⁸⁾) 又, (2)式
 に塑性変形を付与したモデルは 塑性破壊モデルと呼ばれる。

非弾性変形に伴う弾性定数の変化は, 微視的過程に由来する
 ければ, 弾性と塑性の連続挙動により表現する事も可能である。
 つまり, 弾性コンプライアンスが塑性変形に影響される関数形
 を求めれば良い。(例えば, Maier & Hueckel (1979)⁹⁾)

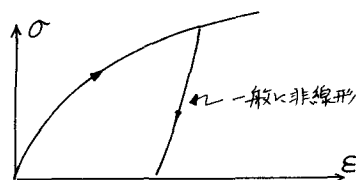
弾塑性モデルは, 上記モデルのうち, 破壊性材料を除くいずれか(a), (b)において $C_{ijkl} = \text{const}$ により (d) となる
 のモデルでも, 弾性コンプライアンス不変-各行をよける事によ (b) において, $\dot{\xi}^p \approx 0$ により (c) となる。
 り得られる。図1にこれらの関係をもとめて記す。

4. 二つの非弾性成分と有する構成モデルの特徴

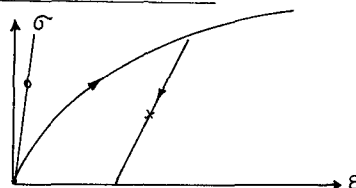
二つの非弾性成分と有する構成モデルは, 地盤材料のより本質的な微視的メカニズムと反映するモデルであると
 考へる事ができる。この種のモデルは, より広範囲の変形挙動を統一的に記述する事が可能とされる。例えば,
 1) 弾性定数の応力履歴, 経路依存性, 2) 圧縮変形とせん断変形・連次挙動, 3) ひずみ軟化・連続体力学・範囲
 内での記述等である。これらの特徴に関する具体的なモデルを以下に挙げる。実験結果と比較, 政府に列の機会に
 発表する。この種の構成モデルは, 地盤材料の基本的な変形・破壊問題の解明に有用であると考へられている。工学的
 応用には, パラメータ決定等の問題も今後解決しなければならない。

5. 参考文献

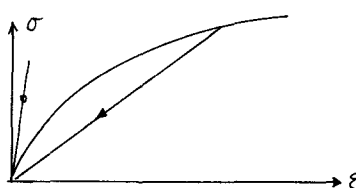
- 1) Asaro (1983) 'Advances in Applied Mechanics Vol. 23 pp. 1~115', 2) Havner (1982), *Mechanics of Solids*
 (ed. Hopkins & Sewell) pp. 265~302, 3) Bazant & Kim (1979), ASCE J. Engineering Mech. pp 407~428 4) Horii & Nemat-
 Nasser (1986), Phil. Trans. of the Roy. Soc London A Vol. 319 pp 337~374 5) Horii & Nemat-Nasser (1983), J. Mech. Phys. Solids
 Vol. 31, No 2 pp. 155~171, 6) Tobita (1987), 例: 土木工業大誌要 pp. 107~117, 7) Dragon & Mroz (1979) Int. J. Engng. Sci.
 Vol. 17 pp. 121~137, 8) Dougill & Rida (1980) ASCE J. of Engng. Mech. Vol. 106 pp. 1021~1038 9) Maier & Hueckel (1979) Int. J. Rock Mech. pp 77~92



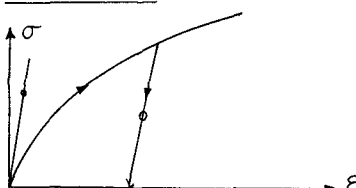
(a) 構造変化+可変モデル



(b) 塑性-破壊モデル



(c) 破壊性材料



(d) 弾塑性モデル

図1. 地盤材料の種々の構成モデル