

III - 42

超過応力モデルによる地盤材料の時間依存性の表現に関する基本的考察

東北学院大学工学部
東北学院大学工学部
東北学院大学工学部

学生会員 ○山根 久和
正会員 山口 晶
正会員 飛田 善雄

1 はじめに

地盤材料の時間依存性挙動の最も代表的なものとして、圧密沈下がある。圧密沈下は土粒子に、間隙水圧の消散による変形・沈下の遅れが見られる現象（一次圧密）である。本研究で問題とする時間依存性挙動は、土骨格自身が示す性質を意味する。この土骨格自身が示す時間依存性挙動の工学的問題として、間隙水圧の消散なしに土粒子のみが沈下する現象（二次圧密）が挙げられる。その他に、岩盤のクリープ変形による基礎の沈下、大規模掘削後の基礎に作用する圧力の増加等がある。

地盤材料の時間依存性挙動を表現するモデルとして、Isotach 特性を基本とする超過応力モデルがある。他に二次圧密を表現する流動曲面モデルがある。ここで、Isotach 特性とは粘塑性ひずみに応じて応力とひずみがそれぞれ一意的に決まることである。しかし、Isotach 特性を仮定する超過応力モデルでは、載荷（ひずみ）速度が急変する時の飛び出し現象（図-1）や、クリープ後の硬い挙動（図-2）を説明できない。本研究では、載荷速度が急変する時の飛び出し現象の表現を試みる。

2 超過応力モデルの基本的性質

地盤材料を非弾性変形まで考えたとき、時間依存性挙動のモデル化には弾/粘塑性理論が広く用いられている。弾/粘塑性モデルは、大きく区分すると、超過応力モデルと流動曲面モデルがある。

超過応力モデルは簡単なモデルであり、解の唯一性などが保証されているという数値解析上の有利さを持つ。そのため、時間依存性挙動を表現するモデルとしてよく利用される。

超過応力モデルは、応力空間に静的降伏関数と動的負荷関数を導入することにより、粘塑性ひずみ速度の大きさが動的応力（動的負荷曲面）と静的応力（静的降伏関数）の差、すなわち超過応力の関数 F として与えられる。粘塑性ひずみ速度は応力速度に依存せず、超過応力関数 F によって規定される。つまり、発生する粘塑性ひずみ速度は、状態変数と応力だけで決定されることになる。図-3 に概念図を示す。

3 時間依存性挙動を表現するモデルの現状

工学材料が示す時間（速度）依存性挙動に、現在 2 つの大きな問題が提示されている。その 1 つは、時間依存性挙動の本質に係わる問題であり、時間依存性はどのようなメカニズムによりもたらされるのかと言うものである。もう 1 つの問題は、時間依存性挙動の構成モデルに対しての統一的な考え方とその定式化である。

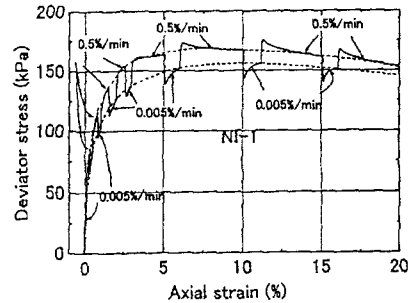


図-1 載荷速度急変時の飛び出し現象

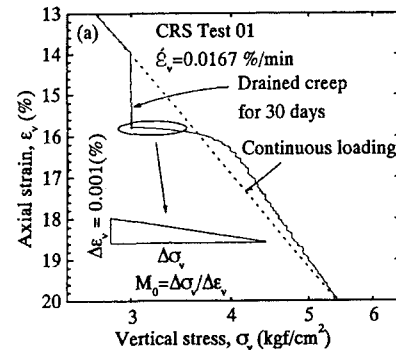


図-2 クリープ後の硬い挙動

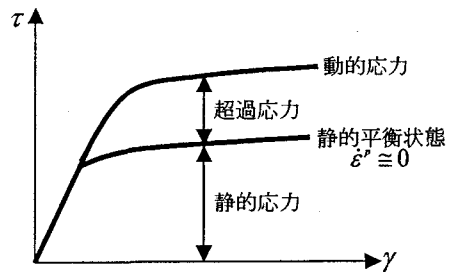


図-3 超過応力モデルの概念図

時間依存性挙動のメカニズムとして、超過応力モデルは静的平衡状態に比較して、載荷速度が速い場合に増加する応力は粘性効果と考える。しかし、粘性効果とは物性的に説明ができず曖昧である。むしろ、全ての微視的現象は、拡散や運動などの時間に依存する変形であり、構造変化が時間遅れを伴って起こる現象と考えた方が理解しやすく、さらに弾塑性論などとの整合性がよい。

これらの事を踏まえて、内部変数理論に基づく新しいモデルの構築を考える。

統一的表現を目指した内部変数理論に基づく時間依存性挙動の解釈は、あるひずみで作用する応力が異なるのは、内部変数として表現する構造変化の遅れのためである。構造変化が遅れると粘塑性ひずみの発生が遅れ、作用する応力が大きくなる。構造変化が考えている時間と比較して瞬時に終われば、弾塑性体としての定式化になる。構造変化、すなわち粘塑性ひずみが時間依存性を示せば、構成モデルは時間依存性を示す。

4 内部構造変化の時間依存性について

内部構造変化の特性時間(例えば、最終変化の90%が終了する時刻)が短い場合には、その内部構造変化による非弾性ひずみは時間依存性のない塑性ひずみとして定式化できる。この塑性ひずみの発生により、時間に依存しない応力低下が発生する。

内部構造変化の特性時間が問題の特徵的時間と同程度の場合には、時間依存性挙動として取り扱うことが必要になる。時間経過とともに時間依存性挙動は進行し、非弾性ひずみは大きくなる。この非弾性ひずみの発生により、作用している応力は減少することになる。材料の载荷条件が変わらず時間が十分に経過した場合には、時間依存性挙動は収束し、時間依存性を示さない「最終的塑性状態」に至ることになる。

材料モデルとして時間依存性挙動を取り入れるか否かは、解析対象とする時間のスケールに依存するものである。

5 材料の時間依存性

同じ土であっても、爆撃などの衝撃载荷に対しては弾塑性体として定式化する。問題によっては、弾塑性体、弾粘塑性体としての定式化が必要である。

時間依存性について、極めて速い、中程度、極めて遅いの3つの特徴的時間を考えると、同じ材料でも状況が違う場合の材料の時間依存性に対して、異なるモデルが妥当となる理由の考察などの有用な考察が可能となる。例えば、物体内部で生じている構造変化の時間依存性挙動の特性時間が対象とする問題の特徵的時間と比較して同程度、大きい場合、小さい場合には異なるモデルとなる。

ここでは、中程度と遅いの2つのメカニズムに対するモデル化を対象とする。

6 飛び出し現象を考慮した構成モデルの定式化

地盤材料の時間依存性挙動のうち、表現が最も難しいのがひずみ速度を変化させたときの飛び出し現象である。飛び出し現象とは载荷速度が急変するとき、増加過程では上がり過ぎが生じ、減少過程では下がり過ぎが生じることをいう(図-1)。

構成モデルの構築は、载荷速度が急変時のみに作用する関数を導入することによって行なった。

载荷速度の急変時のみに作用する関数を ϕ と定義

する。 ϕ は上がり過ぎ現象が生じる時には、1以下の値をもち、変化速度が大きいほど0に近い値とする。逆に、下がり過ぎ現象が生じるときには、1以上の値をもち、変化速度が大きいほど2に近い値とする。図-4に ϕ の基本的関係を示す。

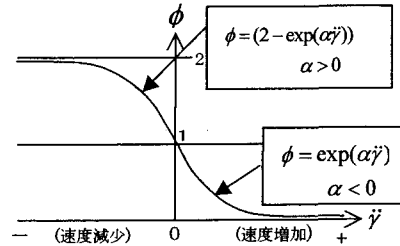


図-4 関数 ϕ の速度変化依存性

以下に ϕ の基本的関係式を示す。

1) 上がり過ぎ現象のときの ϕ 関数

$$\phi = \exp(\alpha \dot{\gamma}) \quad ; \alpha < 0 \quad (1)$$

2) 下がり過ぎ現象のときの ϕ 関数

$$\phi = (2 - \exp(\alpha \dot{\gamma})) \quad ; \alpha > 0 \quad (2)$$

また、次のような関数形を粘塑性ひずみ速度として与える。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\gamma}^{p*} &= \phi \dot{\gamma}^p \\ \dot{\gamma}^{p**} &= \dot{\gamma}^p - \phi \dot{\gamma}^p = (1 - \phi) \dot{\gamma}^p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上がり過ぎ現象は式(1)の ϕ が粘塑性ひずみの発生を抑制するため応力を増加させ飛び出す。载荷速度一定時には抑制された粘塑性ひずみが多く発生するため、飛び出した分が戻るため、ひずみ速度一定時に戻る。

下がり過ぎ現象は式(2)の ϕ が粘塑性ひずみの発生を促進するため応力を減少させ飛び出す。载荷速度一定時には促進された粘塑性ひずみが少なくなるため、飛び出した分が戻るため、ひずみ速度一定時に戻る。

7 まとめ

- ・内部変数理論に基礎を置くモデル化の有利さについて説明した。
- ・ ϕ 関数に物理的意味を与えることができなかった。
- ・飛び出し現象が不連続現象であるため有意なプログラム作成が難しく、満足な計算結果が得られなかった。
- ・飛び出し現象についてのモデル化を試み、モデル化の可能性は示すことができたが、物理的意味を与えることはできなかった。

8 参考文献

- 1) 飛田善雄：内部変数理論に基づく地盤材料の弾・粘塑性モデル(研究室内資料)。
- 2) Tatsuo K., F. Santucci de Magistris, Hayano K., & Koseki J., & Momoya Y., (2000): Some new aspects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials, The Geotechnics of Hard Soil/Soft Rocks.