

1. はじめに

直下型の地震に関する共通セッションであるが、地盤震動解析の観点からは、直下型と海洋型を区別すべき正当な理由は、現時点では見当たらないので、本文では「直下型」という用語にこだわらずに、一般的な議論を展開する。特に、有効応力解析を対象とした場合の構成モデルの発展の現状と課題を中心に議論する。

2. 地盤震動解析の分類

地盤震動解析は通常、図1に示す様に分類される。その簡単な特徴も合わせて表現している。地盤材料は非線形性の強い材料であるために、何らかの方法で剛性がせん断ひずみレベルに依存する非線形性が解析手法に反映されている。非線形性の他に、地盤材料は基本的に摩擦性材料であるために、粒子を介して伝達される有効応力の大きさにその剛性および強度が支配される。緩い砂は負のダイレイタンス（圧縮）を示す。このために、地下水が存在するときには地震時に間隙水圧の上昇をもたらす、有効拘束圧が著しく減少し、剛性と強度が大きく低下し、いわゆる液状化現象をもたらすことになる。このような、せん断ひずみレベルの増加と有効拘束圧の変化による物性の変化を取り入れながら時刻歴応答解析を行うのが有効応力解析である。

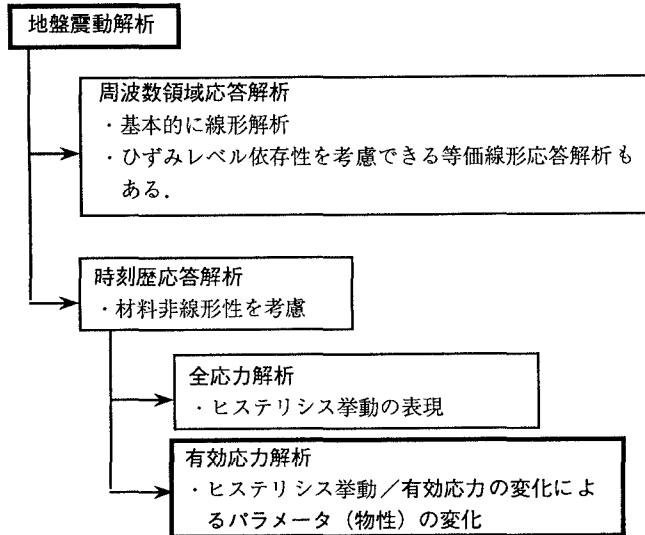


図1：地盤震動解析の分類

有効応力解析は、特に、固有周期の長い長大構造物の震動解析を行う際に重要であると考えられている。地盤の劣化（特に有効応力の減少による剛性低下）に伴い、構造物への入力地震動の卓越周期が構造物の固有周期に近づいていくことが懸念され、それを解析に反映させる必要性があるからである。

さらに、新潟地震や阪神大震災で見られたように、飽和砂地盤の液状化による大きな沈下や側方流動のシミュレーションを目的とし、その基本的なメカニズムを反映する場合には、用いるべき正当な手法は必然的に、有効応力解析となる。しかしながら、有効応力解析は未だ研究レベルに留まっており、その実用性は高くはない（もちろん、このことについては異論があろうが）。その理由は、地盤情報の精度が十分でない以上、解析の精度を向上させても、対象とする地盤全体の震動解析の信頼度が向上することにはつながらないという地盤工学の宿命的な問題以外にも、期待されていた程、強震時の液状化現象の根本的な理解につながっていないことがあげられる。より現実的な液状化現象のシミュレーションを行うためには、解決すべき問題は山積している。その一つは、固体としての地盤という観点から見れば、液状化現象は基本的に不安定な挙動を含むものであり、条件によってはせん断帯の発生などの分岐も含んでいる。このような現象を含む解析は、より簡単な静的な問題であっても（様々なモデル化の提案、計算アルゴリズムの提案がなされているにも関わらず）解決からは程遠いのが現状である。動的解析においては、このような分岐・不安定挙動をその解析に取り入れる試みはなされていないのが現状である。砂のもつ剛性を（常識的には不当に）大きく低下させて、液状化後の地盤流動の大きさを予測しようとする数値解析はなされているが、そのオーダーがあったところで（その実用的・工学的目的は十分に認めるが）、その結果が流動・沈下現象を正しく表現していると主張することは、原則的に無理があるように思われる。

もう一つの問題は、有効応力解析に用いるべき構成モデルの問題である。より、現実的なシミュレーションを行

う場合には、古典的モデル化では、原理的な観点からは不十分に思われる。次項でこのことを述べる。

3. 有効応力解析に用いる構成モデルの必要条件と現状

実際の現象を表現するような地盤震動の有効応力解析に使用するための繰り返し載荷用構成モデルの定式化において、重要となる性質は以下の3つであろう：(1)適切なヒステリシス（剛性変化）の表現；(2)間隙水圧の変化と密接に関連するダイレイタンス特性の適切な表現；(3)液状化後の大きな沈下や流動特性を表現するための構造変化を表現するパラメータの同定とその発展（移行）則の決定。これらの性質は応答解析に定量的な影響を与えるのはもちろんのこと、解析結果の定性的性質にも大きな影響を与える。

現時点においては、多次元状態に適用できる繰り返し載荷時の構成モデルの主流は、弾塑性理論を基本的枠組みとし、繰り返し挙動を表現するために、現応力点が存在する降伏（負荷）条件以外に、境界曲面などの参照曲面を導入し、降伏条件と境界曲面の相対的な位置関係を表現するスカラー量により塑性係数を決定するという手法であろう（図1参照）。

この手法を基礎として定式化を考えたとき、塑性ポテンシャル関数の勾配により塑性ひずみ増分の方角を決定するという古典的な定式化では、十分に繰り返し載荷時の挙動を表現できない。その典型的な例は、異方圧密された飽和砂地盤が、最も単純なかつ重要な応力経路である単純せん断を受けたときに観察される。すなわち、計算される間隙水圧の上昇量は実験値と比較して極めて小さな値しか示さないのである（図2参照）¹⁾。これは、既に堆積過程で異方圧密状態になっており、単純せん断による（動的）せん断応力は主応力軸の回転（この場合には、物理角で45°）をもたらすからである。この時には、実際にはダイレイタンスは（初期せん断力の大きさととはほぼ無関係に）大きくでるのに対して、多くの弾塑性モデルでは、すでに変相線（ダイレイタンスが負から正に変化する線）近傍に存在するために、動的載荷後すぐにダイレイタンスが負から正へ変化するためである。

主応力軸が回転するような状況においては、ヒステリシス、ダイレイタンス共に増分方向にその応答が依存するために、構成モデルは増分非線形性を持つことになる。状態量のみで塑性ひずみ増分の方角が一意的に決定される定式化ではこのような現象を表現することができないことは明らかである。また、記述すべき現象(3)の液状化後の大きな沈下や流動特性は、極めて複雑な現象であり、その基本的メカニズムは未だ正確には理解されていない。多分に砂の様な粒状体が形成する特殊な内部構造の崩壊・再構築に関する現象であろう。すなわち、同様に有効拘束圧が0近傍で間隙比がほぼ同一であっても、全体的な圧縮性が全く異なるような内部構造を持つことができると考えて初めて理解できるような現象である。この特殊な構造の重要性が、研究レベルにおいても強く認識されたのは、静的な単調載荷状態でのせん断帯の幅と関連して、つい最近の事である。詳細なメカニズムにこだわらずに、現象論的にこのような内部構造の変化を構成モデルで表現しようとする場合には、これを精度よく表現するパラメータの同定とその移行則が決定されなければいけないが、不明な点が多く今後の研究課題となっている²⁾。

参考文献：1) Tobita and Yoshida(1995): in Earthquake Geotechnical Engineering(Ishihara, ed), Balkema, pp.429-434

2) 飛田・吉田(1997):構造変化を考慮した砂の様な粒状体の構成モデルに関する基本的考察、平成9年度地盤工学会研究発表会

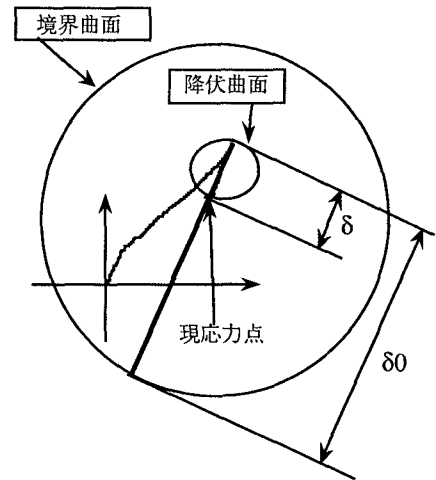


図1：境界曲面を利用した塑性係数（ヒステリシス）の表現： $(\delta/80)$ と塑性係数 H が関係づけられることによりヒステリシスを表現する。

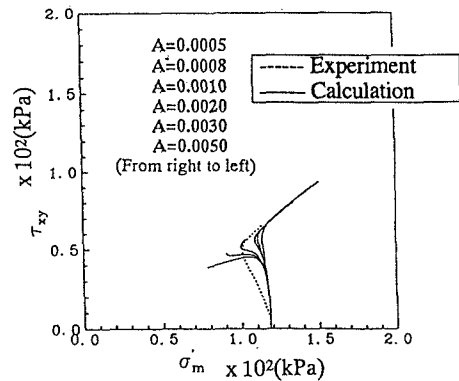


図2：古典的な定式化による間隙水圧上昇が十分に表現されない例：異方圧密+単純せん断載荷（文献1参照）