

# 地盤と構造物の動的解析と構成モデル

## Dynamic Analysis of the Ground and Structures and Constitutive Model

若井明彦 (わかい あきひこ)

群馬大学工学部 建設工学科

酒井久和 (さかい ひさかず)

防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター

湯浅明 (ゆあさ あきら)

(株)日本解析センター

### 1. はじめに

地盤と構造物の地震時挙動予測において、適切な土の構成モデルの選択は特に重要である。土の繰返し載荷条件下での力学挙動は複雑であり、厳密な再現のためには精緻な構成モデルを用いなくてはならない。ひずみレベルに応じた変形特性、減衰特性、飽和度、透水性、繰返しによる軟化・硬化、異方性等、種々の特性を考慮できるかどうかに着目して構成モデルが選択される。しかし、実務で実際に用いられる構成モデルがこれらを適切に表現したものであるとは限らない。むしろ解析に用いられるモデルにいくつかの典型的なレベル種別があることを念頭に置く必要がある。このレベルは結果の厳密性の度合いと密接に関わるが、各レベルの数値モデルが実務設計の要求に応じて合理的に使い分けられている現状を考えると、これらに能力の優劣を見出す総括より、数値モデルの選択の相違に基因する結果の定性的差異について、事例紹介を通じて工学的な評価を与えるのが、より一般の読者に益のある報告となろう。

なお、動的現象のモデル化の本質は狭義の構成モデルにとどまらない。現象の記述に必要な系の運動方程式には、多くの場合、粘性減衰項が含まれるが、粘性を支配するパラメーターも間接的に土の物性を表すものと見なせば、これもまた構成モデルの一部を構成していると考えられる。一方、本稿では扱わないが、液状化などにおいては、土-水連成系の表現自体に種々の流儀がありうる。これらの選択も、解析者による土のモデル化の一環として行われるのならば、ある意味で構成モデルの選択を一部分担していると考えられることもできる。

次章では、今日広く行われる地盤と構造物の動的解析の例として、等価線形解析、非線形解析、残留変形予測を順にあげ、それぞれの立場の違いを明確に示すことで、構成モデルの結果への影響について間接的に評価を与えることにしたい。特に、簡易計算手法として実務でなじみの深い等価線形解析と通常の時刻歴非線形解析との相違、動的現象を解釈する上で周波数領域と時間領域というそれぞれの発想、系の残留変形を予測するためのモデル化上の留意点などについて、構成モデルの役割という観点から順に述べる。

### 2. 地盤と構造物の動的解析の例

#### 2.1 等価線形解析の例

等価線形化法<sup>1)</sup>自体は構成モデルではないが、この手法を前提とした簡易な繰返し載荷モデルは実務でなじみが深いため、ここで区別して採り上げることにした。等価線形解析は時刻歴非線形解析に代わる簡易予測手法の一つであり、周波数領域での動的応答解析を行い、各要素のせん断ひずみから収束せん断剛性を求める手法である。通常  $1 \times 10^{-6} \sim 10^{-2}$  程度のせん断ひずみレベルにおけるせん断剛性および減衰の関係（動的変形特性）に基づいて解析を行う。本手法は次節で紹介する時刻歴非線形解析より多くの設計実績があるが、これはモデル化の対象とする力学特性がより単純化されており、パラメーターの設定やその妥当性評価が容易、また計算時間が短い等の実務的なメリットがあるためである。もちろん大きな塑性変形を伴う問題に対して等価線形解析を適用しても残留変形量等の定量的情報は得られない。しかし、このような場合にも、予測された応答値の妥当性を定性的に評価する場合などに利用されることがある。

最近では地盤と構造物の三次元的な相互作用を検討する機会が増えたが、多自由度の解析を行う場合、計算機をより有効に活用するための工夫が必要となる。湯浅ら<sup>2)</sup>は小規模アースダム（図-1）を題材に、等価線形化法による三次元地震応答解析における計算時間の短縮化を試みた。従来の等価線形化法は、周波数領域での動的応答解析を行い、各要素のせん断ひずみから収束せん断剛

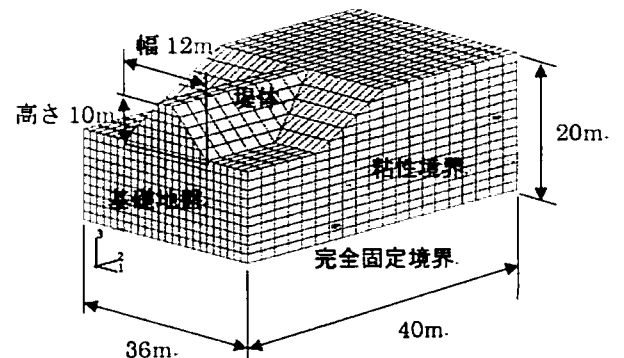
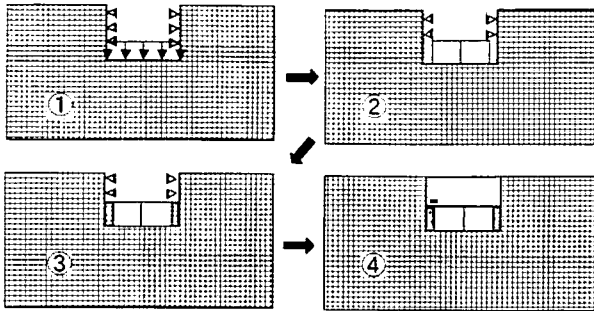


図-1 アースダムの等価線形解析の例<sup>2)</sup>



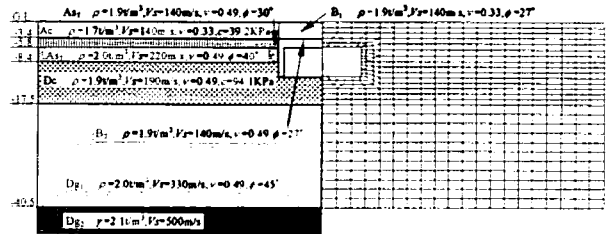
図一 開削地下構造物の初期応力解析の荷重プロセス<sup>5)</sup>

性を求めるのに対し、本解析手法ではモード解析の結果を利用することにより、せん断ひずみから収束剛性を求めるものである。本事例では、ダム堤体はせん断波速度  $V_s = 100 \text{ m/s}$  の砂質土、基礎地盤は  $V_s = 200 \text{ m/s}$  の粘性土が想定されている。地震中の繰返し載荷に伴う非線形特性、すなわち  $G/G_0-\gamma$ ,  $h-\gamma$  曲線は既往の資料<sup>3)</sup>に基づいた。入力地震動は最大加速度  $2.0 \text{ m/s}^2$  の八戸波で継続時間は20秒 ( $\Delta t = 0.01$  秒) である。本稿の趣旨から外れるので詳細な検討結果は割愛するが、提案手法により、従来の等価線形化手法の1/80程度の時間で計算が完了した。

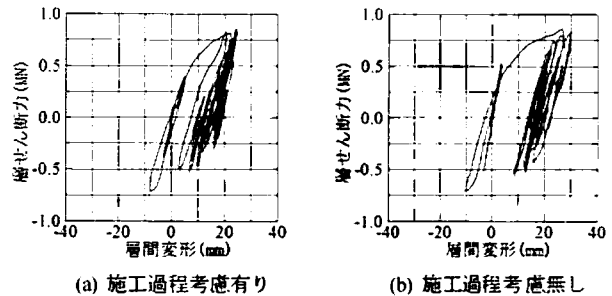
系の塑性変形量自体がさほど問題にならず、むしろ自由度の多さによる計算機負荷を低減したい場合に、等価線形解析のような簡易計算法は有効である。あるいは、一次元せん断波伝播において地表面応答波形を基盤入力に引き戻す操作、計測振動からの地盤物性の同定など、線形問題特有の応用が本手法により実現することにも併せて留意すべきであろう。

### 2.2 時刻歴非線形解析の例

前節で述べたような周波数領域の解析では、地盤の非線形性を等価線形化手法に基づいて近似するものの、想定する非線形性自体は一般に実験で得られた土の動的変形特性に則ったものであり、合理的である。また二次元や三次元解析では概して計算時間が時刻歴非線形解析に比べて小さく、解もより安定的である。一方、非線形地震応答解析の方は、従前、実験の土の動的変形特性と異なる復元力モデルを用いた解析が一般的であった。近年、石原ら<sup>7)</sup>をはじめとして、土の動的変形特性を精度良く再現できる構成モデルが提案、動的解析プログラムに導入され、動的変形特性を適切に考慮した解析が行えるようになりつつある。しかし、実務では土の動的変形特性に配慮されていない動的解析事例も少なからず見られるのが現状である。土木構造物の地震時の耐震性評価手法は大きく様変わりしてきている。道路橋示方書や鉄道構造物等設計標準では、L2地震動に対して非線形動的解析を行うことを推奨するようになり、研究レベルに留まらず、実務レベルでも非線形動的解析コードを用いた検討の機会が増えてきている。そのような中にあり、時刻歴非線形解析に適した構成モデルを選択することの重要性は近年ますます増していると言って良い。



図一 開削地下構造物のモデル化と地盤特性<sup>5)</sup>



図一 層せん断力と層間変形<sup>5)</sup>

本節では、酒井ら<sup>5)</sup>が行った時刻歴非線形の事例を紹介する。本解析事例は1995年の兵庫県南部地震の際に甚大な被害を受けた開削地下構造物に関するものである。解析コード“STADAS”<sup>6)</sup>を使用し、図一2のように開削構造物の掘削、躯体の構築、埋戻しといった施工過程を考慮した。解析メッシュおよび地盤特性を図一3に示す。構成モデルは地盤として前述の石原らのモデル、構造物として武田モデルを採用した。

解析の結果として、躯体に作用する層せん断力（構造物に作用するせん断力の合計）と層間変形（上床版と底板間の相対変形）の関係を図一4に示す。ただし、施工過程を考慮しないケースでは完成断面に自重を作用させた。施工過程の考慮の有無によって最大層間変形量に2割ほどの差が生じている。それほど大きな差ではないが、初期せん断を受ける地盤領域が大きい場合には、近接する構造物に作用する応力や変形量に著しい差が生じた解析例も報告されている<sup>7),8)</sup>。

上記のように、構成モデルの精緻化に伴って、応力の開始点が解析結果に有意な差を与えることがあるため、地震の起こる前、常時の地盤の応力状態を適切に与えることが必要となる。またプログラムに採用されている計算アルゴリズムや各種パラメーターが結果に影響する場合もあるため、構成モデルが数値離散化された環境下での挙動についても考慮が望ましい。

### 2.3 残留変形量予測の例

前節までに述べたように、土の動的変形特性は地盤の動的挙動を再現する場合に重要であるが、当然のことながら、これが表現できる構成モデルであるからと言って、あらゆる動的現象を精度良く表現できるわけではない。単調荷重時のピーク強度や残留強度はもとより繰返し載荷に伴う硬化や軟化、初期せん断応力の影響、載荷中の

主応力回転，速度依存効果，複雑なダイレイタンスー特性，引張り破壊の考慮等々，解析目的に応じて新たに追加して考慮すべき土の力学的特性は数多くある。

本節では，繰返し載荷時のひずみ軟化特性を簡易に考慮したモデルを用い，斜面の地震時の残留変形予測を行った若井ら<sup>9)</sup>の解析事例を示す。弾完全塑性モデル<sup>10)</sup>(図-5のCase-1)をもとにひずみ軟化特性を導入した簡易モデル(図-5のCase-2)により，単純斜面(図-6)の地震応答について調べた。この場合の軟化は強度定数を塑性せん断ひずみの関数とすることで簡易に実現している。初期応力分布はせん断強度低減法<sup>10)</sup>により算定した。ひずみ軟化特性の有無を操作した2ケースに対し，振幅2.0 m/s<sup>2</sup>の正弦波を基盤に入力した際の系の応答を動的弾塑性FEMにより再現した。法肩の変位応答時刻歴が図-7である。ひずみ軟化を考慮したケースの方が大きな残留変形を示す傾向が再現されている。土の動的変形特性だけでなくピーク強度ならびにそれ以降の力学特性の考慮が，解析の結果得られる残留変形量に影響する。

### 3. おわりに

地盤と構造物の地震時挙動予測としての動的解析を考える場合，個々の解析手法そのものが提案されてきた背景に，耐震設計思想の変遷があることを想起すべきである。単純な震度法で満足した時代から系の動的応答特性の考慮へ，やがて非線形性とエネルギー減衰，そして塑性化に基づく残留変形の予測，地震時被害の解釈のために要求される情報の量と質は時代とともに大きく変化している。その潮流の中で各構成モデルが果たして来た役割とは，まさに時代の要請で誕生した個々の動的計算手法を根幹で支える力学的妥当性の担保であった。

構成モデルの解析結果への影響を考える場合，特に動的解析の場合，構成モデルが利用される環境，すなわち系の支配方程式ならびにその数値解法が重要な意味を持つ。そういう観点から本稿の各事例を振り返ると，実務での要求レベルに応じて各構成モデルが合理的に利用されている現状が再認識される。性能設計の普及に伴い，解析者による構成モデル識別・選択能力の向上が今後ますます重要となるであろう。

### 参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE, A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) 湯浅 明・川上哲太郎: 等価線形化法による地震応答解析における計算時間の短縮化について, I-62, pp. 123~124, 第58回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2003.
- 3) 沿岸開発技術研究センター, 運輸省港湾局監修: 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), pp. 66~69, 1997.
- 4) Ishihara, K. et al.: Modeling of stress-strain relations of

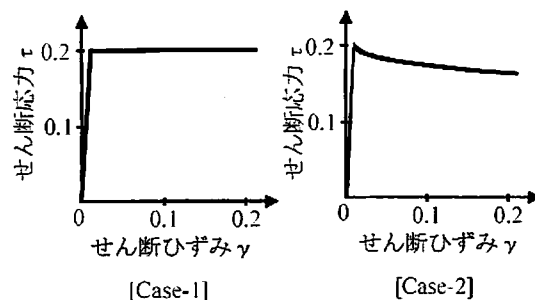


図-5 仮定した応力ひずみ関係の模式図<sup>9)</sup>

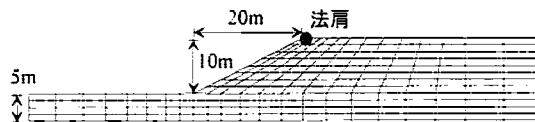


図-6 単純斜面の残留変形解析のモデル<sup>9)</sup>

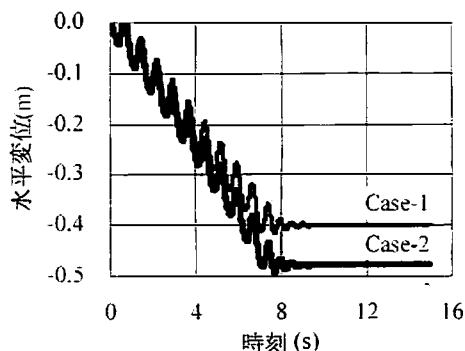


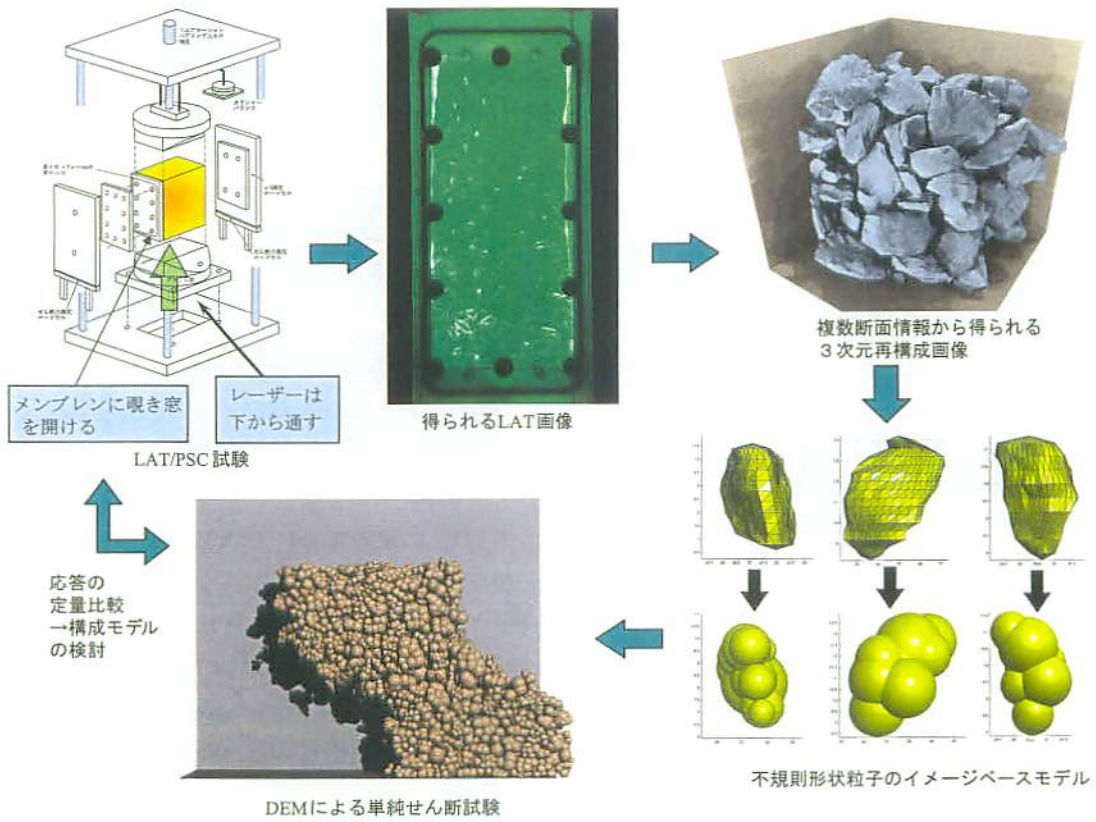
図-7 法肩の変位応答の時刻歴<sup>9)</sup>

soils in cyclic loading, Proc. of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp. 373~380, 1985.

- 5) 酒井久和・中村 晋: 開削トンネルの耐震性評価における初期自重解析の影響, 第26回地震工学研究発表会, pp. 753~756, 2001.
- 6) Yoshida, N.: STADAS, A computer program for static and dynamic analysis of ground and soil-structure interaction problems, Report, Soil Dynamics Group, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1993.
- 7) 龍田昌毅ほか: 有効応力解析プログラム「FLIP」による地盤の初期応力条件を考慮した矢板式岸壁の地震応答解析, 第46回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 13~18, 2001.
- 8) 岡由 剛ほか: 鋼矢板岸壁の被災事例による有効応力解析における初期応力状態のモデル化手法の検証, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol. 26, pp. 813~816, 2001.
- 9) 地盤工学会編: 弾塑性有限要素法がわかる, 地盤技術者のためのFEMシリーズ②, 2003.
- 10) Wakai, A. and Ugai, K.: Dynamic analyses of slopes based on a simple strain-softening model of soil, Proc. International Symposium on Slope Stability Engineering, Matsuyama, pp. 647~652, 1999.

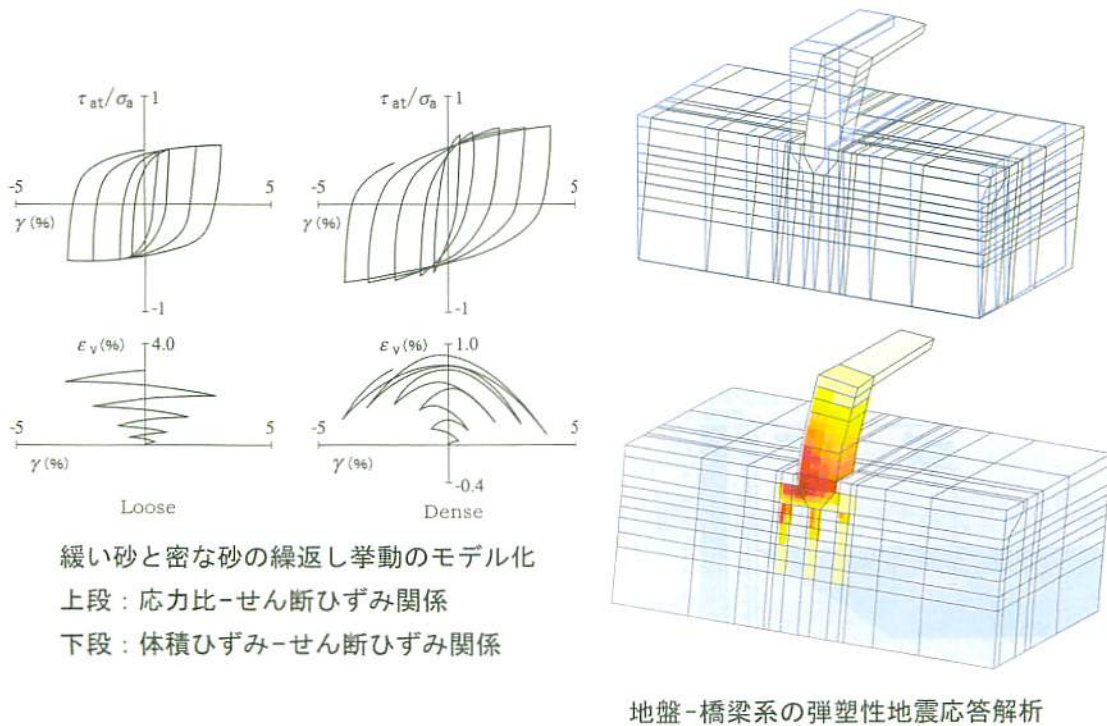
(原稿受理 2004.4.26)

粒状体モデル  
(本文7～9ページ参照)



口絵写真—1 粒状体の微視的挙動を解明するための実験技術の進展に伴い、新しい構造シミュレーション手法が開発されている。この種のアプローチは、新しい土の構成モデルの開発に欠かせないものである。

地盤と構造物の動的解析と構成モデル  
(本文19～21ページ参照)



口絵写真—2 橋梁の地震時の安全性は三次元解析で検討される時代になってきた。密な砂と緩い砂の性質の違いなど原位置の地盤の特性を表現できる構成モデルの開発と応用によって、解析精度が格段に向上している。