

# 有効応力法に基づく2次元動的非線形 解析コードの開発とその適用例

(株) 構造計画研究所 ○大波 正行

沢飯 明広

伊藤 和郎

Earthquake Engineering Technology Inc. 宇高 竹和

## 1. はじめに

新潟地震やアラスカ地震でみられた地盤の液状化による被害を契機として、液状化発生のメカニズム、土の構成式、あるいは応答解析手法などの理論的研究が精力的に進められ、現在まで多くの研究成果が蓄積されてきている。特に、成層地盤を対象とした場合には、液状化現象の予測等に関する定量的評価もなされるようになってきている。

一方、軟弱地盤上に建設される構造物の安全性を評価する場合、2次元的地盤の液状化範囲、液状化が生じた地盤の変形の程度、構造物基礎の支持力や沈下量等の定量的予測は極めて重要となるが、このような2次元的地盤の動的非線形応答の実用的解析ツールは未だ提供されていないのが現状である。これは、解析における膨大な計算時間のため、実用的なモデルの解析計算を行うことがこれまで困難な状況であったことが1つの要因としてあげられる。

しかし、近年のコンピュータの性能の向上や数値解析法の発展から、この種の計算上の問題が大きく改善され、実用規模の解析も可能となってきた。

このような背景のもとで、我々は地盤の液状化を対象とした実用的な2次元動的非線形解析を実現するために、現状で最も効果的と考えられる解析手法を取り入れた解析プログラム「NANSSI」を開発した。本報告は、この2次元動的非線形解析プログラムの概要とその解析例について述べるものである。

## 2. 解析手法と機能の概要

### (1) 支配方程式

NANSSIでは、Biotの理論に基づいた飽和多孔質体の運動方程式を支配方程式として採用しており、地盤を土粒子骨格と間隙水で満たされた二相混合体として扱うことになる。

上記の支配方程式をGalerkin法を用いて離散化し、マトリクス表示すると下式のようなになる。なお、 $u$ は土粒子の変位、 $w$ は土粒子の変位に対する間隙水の相対変位である。

$$\begin{bmatrix} M_s & M_c \\ M_c^T & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & C \\ C^T & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ G \end{Bmatrix}$$

上式中の左辺の第1項は慣性項、第2項は減衰項、第3項は内力の項を示している。式の上段のみを見ると混合体の運動方程式、下段のみを見ると間隙水の運動方程式となっており、通常的全応力解析に適用することも可能である。

### (2) 時間積分法

比較的軟弱な地盤と構造物系の相互作用問題においては、地盤は剛性が低く非線形挙動を示し、構造物は剛性が高く線形挙動を示すことが多い。したがって、このような問題に対しては、時間積分法の選択により、解の精度及び計算コストに大きな差が生ずることがある。そこで、NANSSIでは、領域毎に積分法を変えることが可能な陰・陽混合法を採用している。

### (3) 境界条件

相互作用問題においては、解析モデル境界の処理が大きな問題となる。NANSSIではモデル側面には粘性境界及び重ね合わせ境界 (Superposition Boundary) を、モデル底面には粘性境界を採用している。

### 3. 適用例

盛土を有する軟弱な地盤を対象として、NANSSIを用いて動的非線形解析を行い、従来良く用いられてきた動的等価線形解析による結果と比較を行った。

#### (1) 解析条件

- ・ 解析の対象とした地盤は、図1に示すような盛土を有する軟弱地盤であり、GL.0m以下の地盤は飽和しているものと仮定した。また、地盤の歪依存特性は図2の通りとした。
- ・ 構成則としては、西・金谷<sup>1),2)</sup>が提案している砂の構成則を用いた。砂の液状化強度については、繰返し回数20波で液状化する応力比( $\tau/\sigma'_{\text{ms}}$ )が0.2となるように設定した。
- ・ モデル化範囲及び境界は、計算時間および等価線形解析との整合性等から、側方・底面共、粘性境界とした。なお、水の境界については、側方・底面共で不透水とした。
- ・ 動的非線形解析での時間積分法は陽解法を採用し、積分時間間隔 $\Delta t$ は1/2000秒とした。
- ・ 動的等価線形解析は、当社で開発した2次元動的相互作用解析プログラム「Super FLUSH」を用いて行った。なお、収束計算は4回とした。
- ・ 入力地震動は、1940年エルセントロで得られた観測記録(NS成分：最大加速度341.7GAL)を最大加速度100galおよび200galに基準化し、解析モデル底面の半無限地盤から入力した。観測記録の波形並びに入力動の加速度応答スペクトルを図3に示す。

#### (2) 解析結果

非線形解析と等価線形解析による主要点の応答加速度波形及び最大加速度を図4、5に示す。また、図6に主要点での間隙水圧の時刻歴、図6、7に応力-歪関係及び有効応力径路を示す。図8は震動終了時の間隙水圧比(初期の拘束圧に対する間隙水圧の比)の分布を示す。これらの結果を要約すると下記の通りである。

- ・ 応答加速度は、入力加速度100galの場合では解析法による相違が見られないが、入力加速度200galの場合ではピークの値に差がみられ、非線形解析の方が等価線形解析より小さくなっている。この傾向は、上部砂層で顕著であり、従来指摘されている歪レベルの大きな範囲での等価線形解析法の問題点を立証するものである。
- ・ 入力加速度100galの場合では、間隙水圧の上昇はほとんど見られなかったが、入力加速度200galの場合では、間隙水圧比でみると、大きいところでは0.7程度まで上昇している。
- ・ 間隙水圧比の深さ方向の分布について見ると、GL-5~10m付近の比較的浅い層で大きくなる傾向が見られる。一方、盛土周辺の間隙水圧比について見ると、盛土のり尻部の方が盛土中央部方より大きくなる傾向を示している。これは、拘束圧の相違によるものであり、拘束圧が高いほど液状化しにくいことを示している。

なお、本解析はFACOM M360(3MIPS)で実施し、そのCPU時間は非線形解析で約400分、等価線形解析で約20分と非線形解析が20倍程度であった。

### 4. おわりに

NANSSIによる非線形解析結果は、大きな歪レベルにおいては従来より限界が指摘されている等価線形解析では表現できなかった応答性状の時間上での変化、有効応力及び間隙水圧の変動等が表現されるようになり、両者の結果には大きな相違が見られるようになった。また、NANSSIでは地盤の液状化の予測や震動終了後の間隙水圧の消散にともなう圧密沈下による地盤の変形の予測が可能である。

一方、計算時間も今回の解析は中型汎用機で行ったが、スーパーコンピュータ等の利用を考えれば比較的大きな解析モデルについても十分実用的と考えられる。

今後、土の構成式の検討や実証解析を行うことにより、コードの性能評価を実施していく予定である。

#### <参考文献>

- 1) 西好一、金谷守 (1987) : 地震時における基礎地盤の安定性評価(その5)  
電力中央研究所研究報告, U87033
- 2) 西好一、金谷守 (1988) : 地震時における基礎地盤の安定性評価(その6)  
電力中央研究所研究報告, U88027

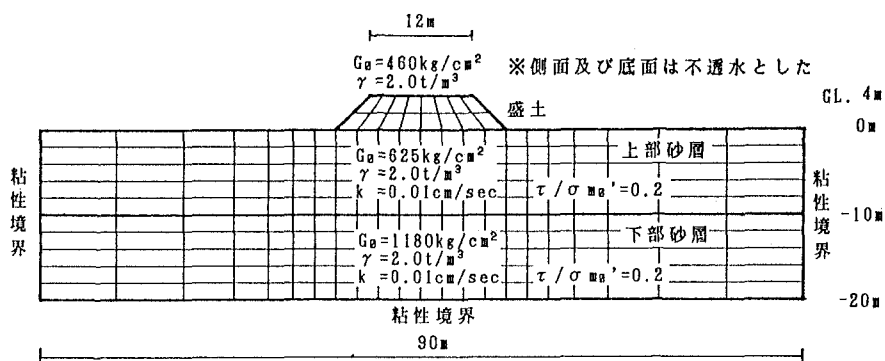


図1 解析モデル

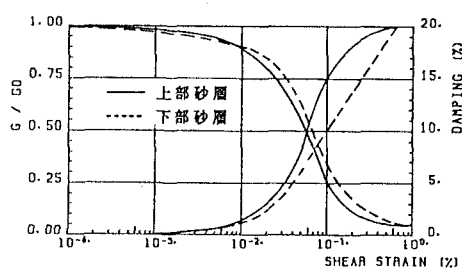


図2 歪依存特性

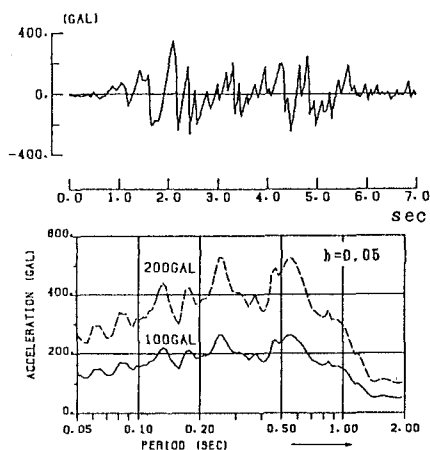


図3 入力地震動

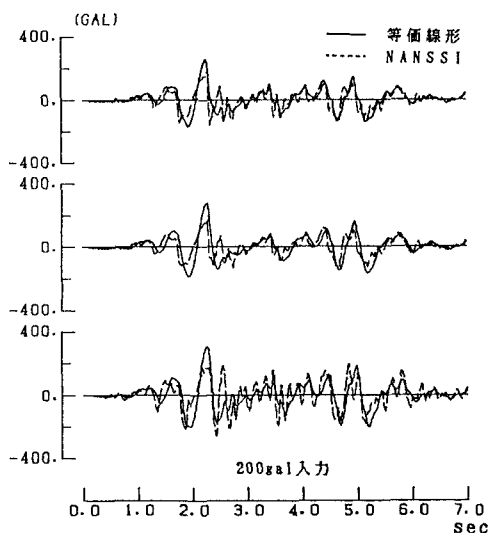
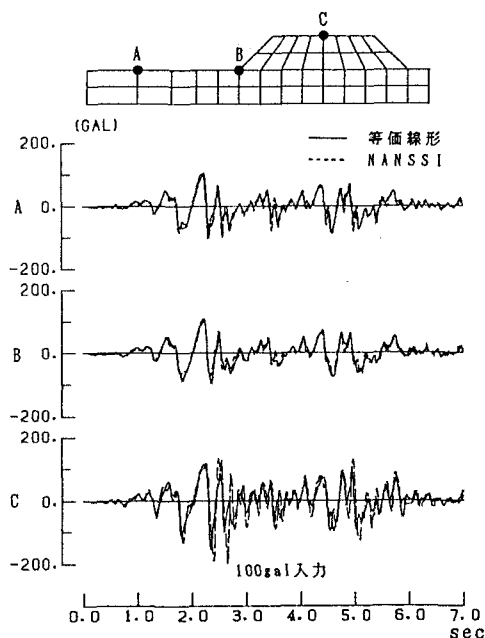


図4 応答加速度波形の比較

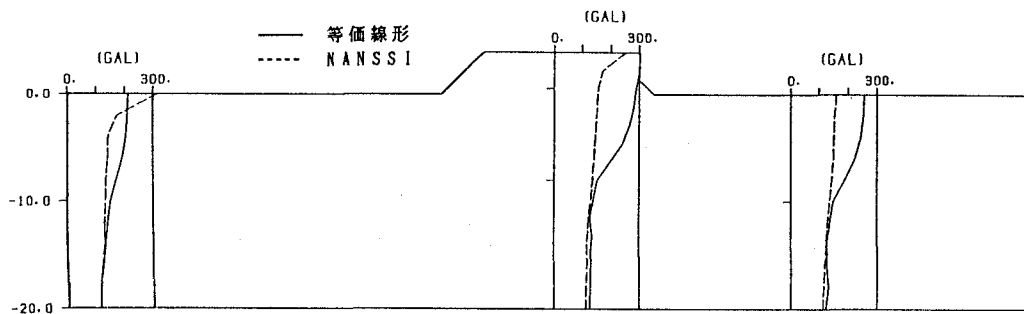


図5 最大加速度分布図 (200gal入力)

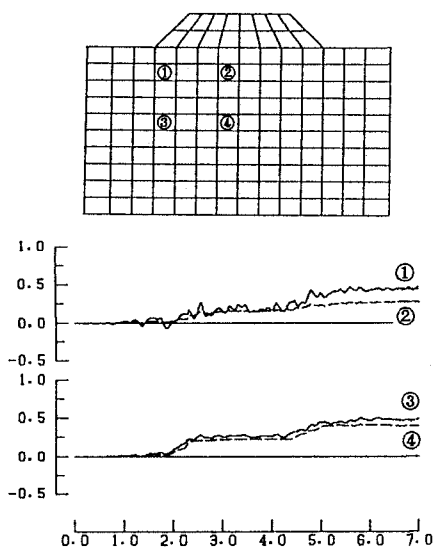


図6 間隙水圧比の時間変化  
(200gal入力)

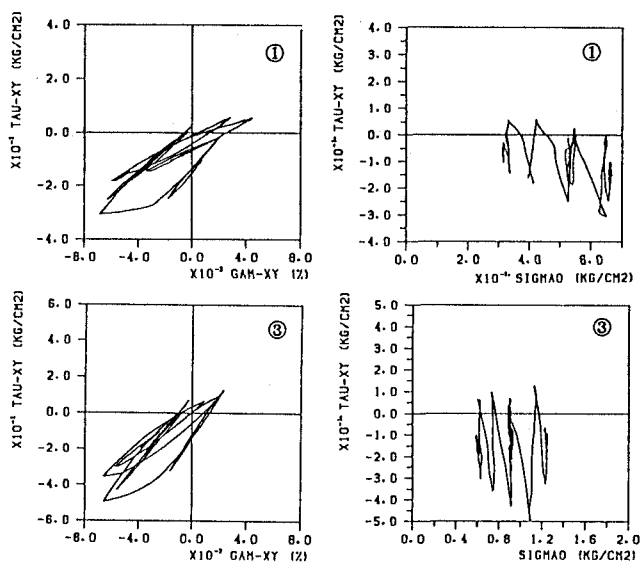


図7 応力-歪関係及び有効応力経路  
(200gal入力)

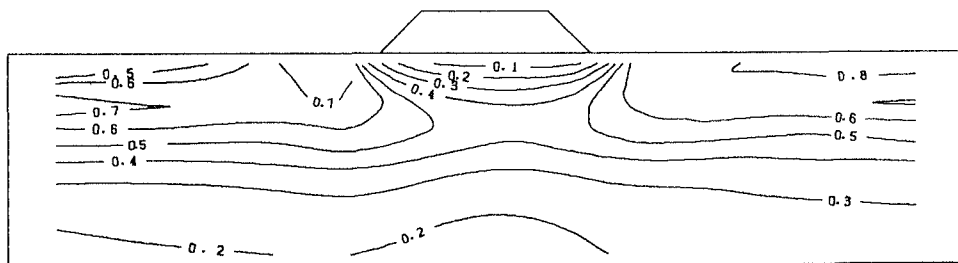


図8 間隙水圧比分布 (200gal入力)