

第2次取りまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その5）

— 耐震安定性評価における解析コードの開発と適用性の検討 —

コンピュータソフト開発（株） 正会員 森康二・根山敦史

核燃料サイクル開発機構 正会員 谷口航・高治一彦・杉野弘幸

科学技術庁防災科学技術研究所 正会員 御子柴正

1. はじめに

人工バリアを含むニアフィールドの耐震安定性評価に資するため、これまでに著者らは地下構造物のモデル化に必要な諸機能を備えた三次元地震応答解析コードの開発を段階的に進めてきた。ここでは、開発した解析コードの概要と模擬人工バリアを用いた振動実験系のシミュレーションを通じた機能検証ならびに実現象への適用性を検討した結果について報告する。

2. 数理モデルと解析手法

本解析コードでは飽和多孔質媒体を土水 2 相系の混合体モデルとし、土骨格 - 間隙水間の動的相互作用を考慮可能な定式化を採用した¹⁾。土骨格と間隙水の平衡方程式は、それぞれ以下のように表される。

$$\text{土骨格;} \quad (1-\varepsilon)\rho_s \ddot{\mathbf{u}} - \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{\sigma}_0) + (\alpha - \varepsilon)\operatorname{grad}(P - P_0) + \frac{\varepsilon^2 \rho_f g}{K}(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{U}}) + \mathbf{f}_s = \mathbf{0} \quad (\text{式 1})$$

$$\text{間隙水;} \quad \varepsilon \cdot \rho_f \ddot{\mathbf{U}} + \varepsilon \cdot \operatorname{grad}(P - P_0) - \frac{\varepsilon^2 \rho_f g}{K}(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{U}}) + \mathbf{f}_f = \mathbf{0} \quad (\text{式 2})$$

ここに、 ε ；間隙率[-]， ρ_s ；土骨格系の質量密度[ML⁻³]， ρ_f ；間隙水系の質量密度[ML⁻³]， $\mathbf{u}$ ；土骨格系の変位ベクトル[L]， $\mathbf{U}$ ；間隙水系の変位ベクトル[L]， $\boldsymbol{\sigma}'$ ；有効応力テンソル[FL⁻²]， $\boldsymbol{\sigma}_0$ ；初期有効応力テンソル[FL⁻²]， P ；間隙水圧[FL⁻²]， P_0 ；初期間隙水圧[FL⁻²]， $\mathbf{f}_s$ ， $\mathbf{f}_f$ ；土骨格、間隙水に作用する物体力[F]， K ；等方性透水係数[LT⁻¹]である。上式における $\cdot$ は時間に関する微分を示し、太字はベクトル量であることを示している。定数 α は土水混合系の体積弾性係数に関するパラメータである。これらを有限要素法により離散化し、土骨格変位および間隙水変位を未知数とした $\mathbf{u}-\mathbf{U}$ 形式で解く。特に土骨格 - 間隙水の連成を直接的に考慮しない場合は、土骨格のみの全応力解析を行うことが可能であり、これと間隙水圧の蓄積・消散モデルとを組み合わせることで簡易的な液状化評価を行うことが可能である。時間積分法には、数値安定性の優れた Newmark の β 法を採用している。非線形解析は線形剛性を用いて非平衡力による残差量を収束させる初期剛性法を用い、さらに応力 - ひずみ関係には骨格曲線を指数関数で表す Ramberg-Osgood モデル（以下、R-O モデル）を採用した。載荷曲線、除荷曲線を規定する履歴曲線については、不規則波による繰返し載荷を考慮した Masing 則に従うものとした。また、材料不連続面のモデル化には Goodman 型のジョイント要素を組み込み、例えば坑道内に埋め戻されたベントナイト - 岩盤間の不連続面の動的応答挙動を表現できるようにした。地盤の半無限性を考慮した地震波伝搬挙動のモデル化には無限粘性境界要素を採用し、処分場に入射した地震波が地表面上方に伝搬する挙動を表現できるようにした。なお、材料非線形性の考慮については、非線形解析および等価線形解析の両解析が利用可能である。

3. 振動実験データを用いた検証解析

炭素鋼製オーバーパックおよび Na 型ベントナイト（クニゲル V1）で構成される工学規模の模擬人工バリア振動実験の結果（正弦加振によるスリーブ試験、実地震波を用いた振動実験²⁾）を用いて、解析コードの機能検証と実現象への適用性を検討する。はじめに、本解析コードの固有値解析機能を用いて基本周波数を算出し、スリーブ試験結果との比較を行う。次いで、実地震波を用いた振動実験結果を線形解析、R-O モデルを適用した非線

形解析および等価線形解析の各機能を用いて実験結果の再現を試みる。

(1) 振動実験データ解析モデルおよび解析条件

図-1 に動的応答解析モデルを示す。供試体は均一に製作されているものと仮定し、模擬人工バリアの 1/8 対称領域をモデル化した。固有値解析では対称性を考慮せず全周モデルを用いた。オーバーバックおよび緩衝材のせん断剛性は、それぞれ $8.1 \times 10^4 \text{MPa}$ 、 1.4MPa 、ポアソン比は 0.3, 0.4 である。また、単位体積重量はそれぞれ 7.77Mg/m^3 、 1.44Mg/m^3 (乾燥密度 0.70Mg/m^3) である。

入力には Imperial Valley、八戸、宮城沖、釜石などで観測された幾つかの実地震動を用いた。加振方向は坑道軸方向 (Y 軸方向) とした。図-2 に Imperial Valley 地震の加速度波形とフーリエスペクトルを示す。なお、非線形解析で用いる R-O モデルパラメータならびに等価線形解析で用いるせん断ひずみ - せん断剛性、履歴減衰の関係は、文献値ないし動的三軸試験より取得した値を用いた。

(2) 解析結果

固有値解析の結果、模擬人工バリアの基本周波数は 36.1Hz となり、スニープ試験の結果 30~40Hz と概ね一致した。実地震波を用いた振動実験結果については、いずれの地震動を入力した場合も顕著な応答増幅は認められなかった。しかしながら、解析結果の一部は人工バリアの基本周波数付近で応答の増幅傾向を示した。このとき発生するひずみレベルは 10^{-3} オーダと小さく、非線形性による履歴減衰は期待できない。そこで内部減衰としてレーリー減衰を考慮し、概略のキャリブレーションを行った結果、減衰を 20% 程度考慮することで実験結果を良好に再現できる見通しを得た。図-3 はオーバーバック付近で実測された応答加速度と解析結果 (非線形解析) の比較である。減衰定数の相違は、模擬人工バリア製作時の不均一さ (緩衝材充填密度の分布など) に起因するものと思われる。

4. おわりに

人工バリアの耐震安定性評価に資するべく、地下埋設物のモデル化に必要な機能を揃えた三次元地震応答解析コードを開発した。本解析コードを用いて、工学規模の模擬人工バリア振動挙動を良好に再現できることが確かめられた。

なお、本研究は核燃料サイクル開発機構および科学技術庁防災科学技術研究所との共同研究の一環として行われた成果の一部である。

5. 参考文献

1) O.C.Zienkiewicz, P.Bettess "Soil and other Saturated Media under Transient, Dynamic Condition; General Formulation and Validity of Various Simplifying Assumptions", Soil Mechanics, Transient and Cyclic load 1982, 2) 御子柴正ほか「深層地下空洞及び内部構造物の振動挙動に関する研究」科学技術庁平成 6 年度国立原子力機関試験研究成果報告書

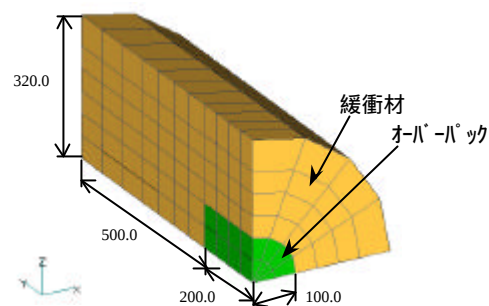


図-1 解析モデル (単位 mm)

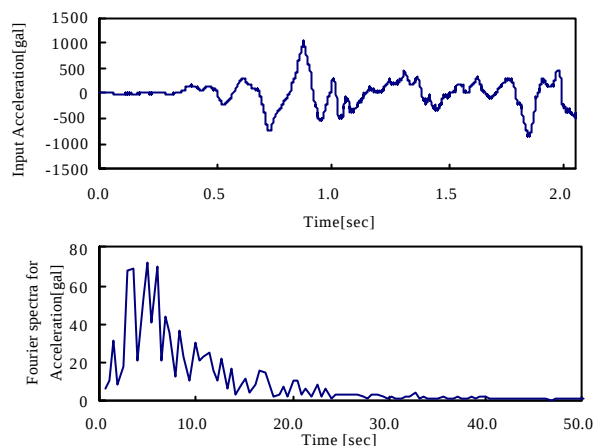


図-2 入力地震動 (Imperial Valley)

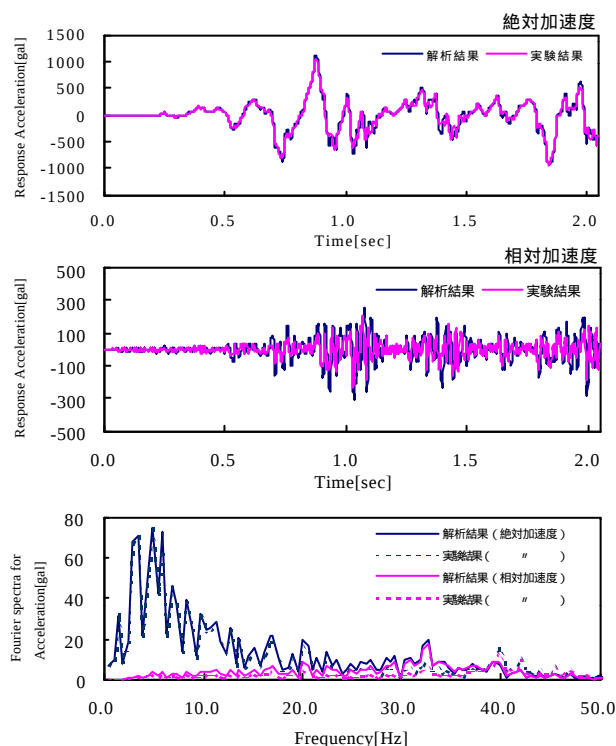


図-3 応答加速度の比較