

人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（V）

- 概要 -

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
ㄨ	J1458 97-004	97.10.10
<p>この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</p>		

1997年2月

コンピュータソフト開発株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理してください。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意してください。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂 1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（V）

森 康二*¹ 根山敦史*¹

田中由美子*¹ 西村和哉*¹

要 旨

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分システムに於ける人工バリアの耐震安定性の評価を目的として、以下の研究を実施したものである。

- (1) 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価を念頭に、地下深部に於ける地震観測事例を調査した。
- (2) 前年度に引き続き、3次元地震応答解析コードの機能追加を行った。本年度は実処分環境に於ける周辺岩盤のモデル化に伴い、地盤の半無限性を考慮する粘性境界要素の追加を行った。
- (3) 改良コードの妥当性を確認するため、簡易モデルによる定性的な検証解析、ならびに動燃事業団殿所有の総合地盤解析システム SIGNAS によるベンチマーク解析を行った。
- (4) 防災科学研究所で実施された1/5スケール人工バリアの振動実験への情報提供(固有値、緩衝材の乾燥密度の影響など)を目的として、予備解析を行った。
- (5) 実処分場を想定したニアフィールドのパラメータ解析を行い、耐震安定性の評価検討を行った。

本報告書は、コンピュータソフト開発株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究内容である。

契約番号 : 080D0247

事業団担当部課室及び担当者 : 環境技術開発部推進本部処分研究グループ
秋好賢治

* 1 科学技術部

Development of Seismic Response Analysis Models and Codes for Engineered Barrier System(V)

Koji Mori*¹ Atsushi Neyama *¹
Yumiko Tanaka*¹ Kazuya Nishimura *¹

Abstract

In this study, the following tasks have been performed in order to evaluate the stability of earthquake resistant for the engineered barrier of geological isolation system for High Level Waste.

- (1) We have investigated the past seismic wave data observed in the deep underground environment.
- (2) An additional function was introduced to the three dimensional seismic analysis code. This year, the viscous boundary finite elements which makes it possible to take account for the semi-infinity in underground was introduced.
- (3) In order to verify the improved code, the verification analysis using simple model and the benchmark analysis using SIGNAS (System for Integrated Geotechnical Numerical Analyses) were conducted.
- (4) We have analyzed preliminary the case problem in order to offer the information, which is related with the eigenvalue and the dependency of dry density of buffer materials to the dynamic property of the 1/5 scale engineered barrier, to the National Research Institute of STA.
- (5) The parameter survey taking account for the realistic isolation system was conducted , and the stability of the earthquake resistance was evaluated.

Work performed by Computer Software Development Co.,Ltd.under contract with
Power Reactor and Nuclear Fuel Development corporation.
PNC Liaison : Isolation system Research Program Radioactive waste Management
Project, Kenji Akiyashi

*1 Scientific Engineering Department

人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発（V）

	項
1. まえがき	1-1
1.1 実施内容	1-1
1.1.1 地中の地震波に関する調査検討	1-1
1.1.2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	1-2
1.1.3 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討	1-2
1.1.4 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性の評価検討	1-3
2. 文献調査	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 文献調査結果の概要	2-1
2.3 地中の地震波に関する調査検討	2-1
2.4 地震応答解析コード改良に関する調査検討	2-2
2.4.1 地盤の半無限性を考慮する代表的手法	2-2
2.4.2 各手法の比較・検討	2-4
3. 無限粘性境界の導入と検証解析	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 粘性境界要素の導入	3-1
3.3 検証解析	3-1
3.3.1 検証方針の検討	3-1
3.3.2 ベンチマーク解析による検証	3-2
4. 振動実験に基づくモデル／コードの妥当性評価	4-1
4.1 はじめに	4-1
4.2 予備解析	4-1
4.3 H7 実験データ解析結果の考察	4-2
5. 実処分場を想定したニアフィールドパラメータ解析	5-1
5.1 はじめに	5-1
5.2 解析ケースの選定	5-1
5.3 解析条件	5-2
5.4 解析結果の概要	5-2
6. 今後の課題	6-1
7. あとがき	7-1
8. 参考文献	8-1

表目次

表 2.4.2-1 各手法の特徴の比較	2-5
---------------------------	-----

図目次

図 3.3.2-1 節点荷重に対する変位応答	3-3
図 3.3.2-2 節点荷重に対する速度応答	3-3
図 3.3.2-3 節点荷重に対する加速度応答	3-3
図 4.2.-1 ベントナイトの乾燥密度の相違による影響 (オーバーパック上の点、絶対加速度)	4-3
図 4.3-1 ベントナイトの減衰比による影響 (H7 年度実験データ解析、相対加速度フーリエスペクトル)	4-3

1. まえがき

ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成される人工バリアシステムは、長期にわたる核種の封じ込め、核種移行の抑制、地下水進入の抑制など様々な物理的・化学的バリア性能が要求される。これらのバリア性能を評価する上では、人工バリアシステムが健全な状態で存続することが前提とされる。すなわち、地層処分を行う際の操業・処分の期間中に、地震に起因する様々なシナリオを想定した解析・評価を行い、人工バリアの設計ならびに人工バリアの性能評価に対し適切な情報提供を行う必要がある。我が国のように地震の多い地質環境条件下における地層処分では、上記人工バリアの健全性を確認するとともに、設計・性能評価側への情報提供を目的とした耐震性評価が重要かつ必要になる。

本研究では、実処分場体系の解析・評価を行うことを目的とし、これまで開発してきた3次元地震応答解析コードの機能拡張（粘性境界要素の導入）、ならびに関連する諸情報（地下深部の地震観測事例など）の調査検討を行い、実処分場を想定した際の解析条件の検討および耐震安定性の概略的な評価検討を行った。

1.1 実施内容

1.1.1 地中の地震波に関する調査検討

実処分場体系での有意な地震応答解析を行うには、人工バリアの立地環境に合わせた入力地震動の選定が必要となる。通常、原子炉施設では、設計用地震動として模擬地震波等が用いられており、これらはサイト周辺の過去の地震活動情報ならびに活断層情報等から選定される。地震動を設定する位置は解放基盤表面であり、多くの場合岩盤表面である。また、対象とする構造物の応答性状を共通の地震波に対して比較するなどの観点から、過去の著名地震波が用いられることもある。しかしながら、地層処分システムの場合、立地環境が数百メートル以上の地下深部を想定している為、解放基盤表面で設定された地震動や地表付近の浅層で観測された過去の地震動をそのまま適用することは現実的でない。サイト周辺の各種情報と地下深部という立地環境を合わせて地震動を設定することが重要である。従って、従来までの工学システムに対して収集されてきたサイト周辺の地震活動情報のみならず、地下深部での地震波特性に関する情報収集を行う必要がある。

本調査は、処分施設の立地地域を限定して行う過去の地震活動や活断層に関する情報収集に焦点を置いたものではなく、従来の工学施設とは立地深度がまったく異なること

を念頭に、地下深部の地震波特性に関する情報収集に焦点を置いたものである。すなわち、これまでに観測された地中地震波を、地域を限定することなく、幅広く調査したものである。ただし、昨年度までの調査結果から、数百メートル以上の地下深部に於ける地震観測事例やそこでの観測波を用いた地震応答解析事例の情報入手は極めて困難なことが予想されるため、地下深部の地震波形と地表・浅層の地震波形との因果関係に着目し、地表・浅層付近の観測波から地下深部の地震波形を予測することが可能か否かを含めて検討することとした。

尚、人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発に係る調査検討に関して、本年度は実処分場体系における解析、評価を念頭に、周辺岩盤のモデル化に伴う機能を一部追加した。すなわち、事実上無限長の広がりを持つ解析対象を有限な系で切断することの効果、周辺岩盤の境界を人為的に制御することで取り込むことである。通常、この種の対応としては、

- ① 無限粘性境界
- ② エネルギー伝達境界
- ③ 混合境界
- ④ 境界要素法とのハイブリッド法

など、幾つかの対応策が提案されている。従って、これらの適用事例等を公開文献より調査し、本プログラムへの機能追加を考慮しつつ、各手法の特徴、利用可能性の整理・検討を行った。

1.1.2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

前項の文献調査結果を踏まえ、本年度のプログラム改良方針ならびに改良箇所を検討し、プログラムの機能拡張を行った。改良プログラムの検証は、

- ① 簡易モデルによる定性的な機能確認
- ② 動燃事業団殿所有の SIGNAS とのベンチマーク解析

を通じて行った。

1.1.3 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性の検討

防災科学技術研究所殿および動燃事業団殿との共同研究で行われる人工バリアの振

動実験に対し、これまでに開発した解析コードを用いて、予備解析を実施した。

本年度はベントナイトの乾燥重量密度を、振動実験との対応を考慮しつつ、より実処分場に近い値に変更し解析を行った。

1.1.4 実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性の評価検討

実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性を検討するにあたり、これまでに考案されてきた各種設計案および場を特徴付ける各種入力パラメータに対する地震応答特性を把握する必要がある。即ち、如何なる因子が地震応答性状にどの程度の影響を及ぼすのかを、定量的に把握することである。これにより、

- ① 処分施設の基本設計仕様に対する影響度
- ② 応答を支配する各種データセットの不確実性への対応

に係わる情報提供が可能となる。①については、現状の各種設計案(例えば、廃棄体の定置方式、オーバーパック肉厚および緩衝材厚さ等)に対し、構造上の健全性を見通すことが可能となり、②については地震発生時の場の状態(すなわち、地震応答解析における初期条件の設定)、入力する地震波形および人工バリアの製作・据付け誤差等の想定する場・事象の不確実性に対し、評価上の保守性を見通すことが可能となる。

地震応答性状に影響を及ぼすと考えられる諸因子は多数考えられるため、それらの全てに対して、人工バリアの地震応答性状を詳細に追求することはFEMモデルの規模、計算時間の観点から現実的でないし、各種パラメータの変動範囲を完全に把握することも容易ではない。さらに、解析結果を保証するFEMモデルについての情報も不足している。そこで、本年度は以下に示す2つの因子に着目し、詳細な感度解析を実施するための解析モデルの構築を主目的とした評価検討を実施した。

- ① FEMモデルの相違による地震応答性状への影響
- ② 廃棄体定置方式の相違による地震応答性状への影響

①のFEMモデルの相違については、ニアフィールドのモデル化領域の相違に着目し、これによる解析結果への影響を評価検討した。②の廃棄体定置方式の相違については、処分坑道横置ならびに処分孔縦置に伴うニアフィールドの形状の相違を考慮したモデル化を行い、地震応答性状への影響を評価検討した。

2. 文献調査

2.1 はじめに

人工バリアの処分環境で想定される入力地震動を設定するため、地下深部における地震波観測事例について調査した。また、解析コードの改良に係わる調査として、粘性境界、伝達境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド法について調査し、各手法の特徴ならびに本解析コードへの導入可能性について整理・検討した。

本文献調査により、国内の地下深部に於ける地震観測状況ならびに解析コードの改良に関する先行事例を明らかにすることができた。

2.2 文献調査結果の概要

公開情報に基づき文献検索を実施した結果、300件余りの文献がリストアップされた。これらを、本研究との関連性に着目し絞込み、調査・整理を行った。

前記のとおり、本検索では地下深部における地震観測事例の入手ならびに解析コードの改良（周辺岩盤のモデル化に伴う境界処理機能の追加）に伴う情報の入手を目的とした2項目について行っている。

これらの文献調査より得られた知見を、以下に整理する。

2.3 地中の地震波に関する調査検討

入手した文献の調査を行った結果、地下数百メートル級の地震波の観測事例は極めて少ないことが明らかになった。このことは、TRU廃棄物処分場への人間侵入の観点から、深層井戸の国内分布状況について調査した統計結果（坂本、妹尾、他 1996）から見ても裏付けることができる。同文献の深度別地下利用状況によると、累積頻度が深度30m以浅で全体の約40%、100m以浅では約60%、300m以浅では約90%、600m以浅ともなると約99.9%になることが報告されている。数少ない観測事例として、先第三紀基盤上の厚さ数kmにも及ぶ堆積層の地震応答特性を把握することを目的に、深層に於ける地震波を直接観測した事例がある（木下、1986）。同文献では、岩槻（3510m）、下総（2300m）および府中（2750m）に於ける各深層井で観測された地震波に関する情報が記載されている。

本来、人工バリアの耐震安定性については、選定されたサイトの地質環境条件を考慮しつつ、過去の地震観測結果などの包括的な情報に基づいた入力地震動の下で議論されるべきものである。しかしながら、現段階ではサイトを特定しない幅広い範囲で研究を推進していること、また、地下深部に於ける地震波情報が不足していること等の現状を加味する

と、これらサイト固有の情報に固執するには限界がある。現時点では、例えば上記の深層井観測波を El-Centro や宮城沖などの過去の著名地震波と同等の意味づけで解析を行うことが有効と考える。

一方、これまでに観測されている表層の地震波など、既存の情報から地下深部における地震波を推定することができれば、少なからず実際の処分環境を考慮した解析が可能となる。通常、水平多層地盤における一次元的な波動伝搬に対しては、重複反射理論などの一般的な手法が適用される。また、波動伝搬媒体の伝達関数を用いた簡易的な推定手法も考案されている (G.N.Owen 等, 1981)。

2.4 地震応答解析コードの改良に関する調査検討

次に、地震応答解析コードの改良に係わる文献としてエネルギー伝達境界、粘性境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド境界に関する評価事例を入手した。検索の結果、粘性境界およびエネルギー伝達境界に関する事例が多く、次いで混合境界、境界要素法とのハイブリッド法の順であった。本研究では、これらの手法ならびに制約条件等の特徴を整理し、各手法の長所・短所を比較の上、本研究で開発中の地震応答解析コードへの導入可能性について検討した。

2.4.1 地盤の半無限性を考慮する代表的手法

(1) エネルギー伝達境界

本手法は、Lysmer, Wass 等により提案されたものであり、FLUSH 等の著名な汎用コードで広く採用されている手法である。ここで対象とする系は、解析領域外部の半無限領域を一様な成層地盤と仮定したものである。領域内部の構造物等で反射された散逸波は、側方境界を表面波と仮定して伝搬するものとする。また、解析領域の底部境界は、通常、剛基盤として処理される。エネルギー伝達境界は、解析領域側方の境界節点に、節点変位に基づく境界力を作用させることで、解析領域内部からの散逸波を吸収するものである。

(2) 粘性境界

本手法は、解析領域境界にダッシュポットを設けることにより散逸波を吸収し、地盤の半無限性を考慮するものである。エネルギー伝達境界や後述の他の手法に比較して、境界におけるエネルギー吸収能がやや劣るといわれているが、幾つかの改良策が提案されており、境界におけるエネルギー吸収能を改善する試みが行われてきた。

一方、下方から上昇伝搬してくる地振動に対して地盤—構造物の相互作用を考慮した動的応答解析を行う場合、モデル底面の境界条件としては粘性境界による散逸波の吸収ばかりでなく、入力地振動の規定方法についての配慮が重要となる（奥村,多田,宇高 1982 他）。

モデル底面を固定基盤とした通常の地震応答解析では、表層での観測波などが、FEM 領域の底面レベルまで引き戻されたトータルモーション（上昇波+下降波）を入力して解析を行う。しかしながら、ここで言う下降波と FEM 領域で生じる下降波とは本来同一のものではない。なぜなら、FEM 領域での下降波は内部に評価の対象とする構造物等があり、これにより反射された散逸波等を含むからである。一方、実際の観測波はそのような散逸波を含んでいない自由地盤中で観測されたものであつたりする。従つて、下方から上昇伝搬してくる地振動に対して、地盤—構造物の相互作用を考慮した動的応答解析を行う場合、FEM 領域の下方部に本来ある地盤中の波動伝搬状況を考慮に入れた入力波を用いて解析しなければならない。以上の問題を解決するため、FEM 領域の底部境界に付与すべき条件を、波動方程式の変位解より定めたものがある（奥村,多田,宇高 他 1982）。それによれば、モデル下部にある地盤の半無限性を考慮し、かつ下降波成分を規定しない解析を行うためには、底部境界で上昇波の 2 倍を粘性境界を介して入力するとともに、散逸波を粘性境界で吸収してやれば良い。

(3) 混合境界

解析領域内部の構造物等で反射された波（散逸波）が境界に到達したとき、この境界が自由境界の場合は散逸波と同じ位相で反射され、固定境界の場合は逆位相で反射される。従つて、2つの反射波を重ね合わせることにより、これを消去することができ、無限遠方領域への波の散逸を表現することができる（W.D.Smith 他 1974）。しかしながら、この手法では消去したい境界の数を n とすると 2^n 個の解を重ね合わせる必要があり、すべての反射波を消去するためには、注目している領域の全体を何度も解析する必要が生じる。これを改善するため、注目する解析領域の外側に新たに境界領域を付加し、解析領域の計算は 1 度だけで、境界領域は重ね合わせるべく解の数だけ解析する手法が提案されている（P.A.Cundall 他 1978）。この境界領域の大きさは、反射波が解析領域内部に進入しない範囲で設定されるものである。なお、Cundall らの手法をさらに 3 次元系に拡張した手法も提案されている（T.Suzuki, M.Hakuno 1985）。

(4) 境界要素法とのハイブリッド法

有限要素法は複雑な系のモデル化や非線形問題の取り扱いにおいて有効な手段であるが、無限領域を対象とした解析でさえ、これを有限な系として切断する必要がある。

一方、境界要素法は半無限領域のモデル化において有効な手段であるが、複雑な系や非線形問題の取り扱いが困難である。従って、両者の利点を併せ持った手法として、有限要素法と境界要素法のハイブリッド法が種々考案されている。本手法の詳細については、例えば文献 26,27 (文献集に収録) を参照されたい。

2.4.2 各手法の比較検討

各手法の特徴および概念を表 2.4.2-1 にまとめた。これらの手法は目的に応じて使い分けが成されるものであり、一概に比較し、それぞれの優劣を判断することは困難である。しかしながら、

- ① 昨年度、機能追加した Ramberg—Osgood モデルに依る非線形解析機能の利用を前提に時間領域での解法を可能にしたいこと。
- ② 人工バリアが地下深部に設置されることから、表面波の吸収はあまり考えなくてよいこと。
- ③ 3次元体系での解析が可能であること。
- ④ 解析ケースあるいは自由度が増大することは避けたい。
- ⑤ 解析コードへの機能追加が比較的容易 (現実的な作業量) であること。

等を考慮すると、エネルギー伝達境界、混合境界および境界要素法とのハイブリッド境界では対処困難である。粘性境界はエネルギー吸収能力がやや劣るといわれているものの、上記項目の全てに対し見通しが得られている。

以上を踏まえ、本作業では現在開発中の地震応答解析コードに、2次元および3次元の粘性境界要素を導入することとした。

表 2.4.2-1 各手法の特徴の比較

	粘性境界	エネルギー伝達境界	混合境界	境界要素法とのハイブリッド法
特徴	解析領域内部からの散逸波を境界におけるダッシュポットで吸収。この減衰力は、散逸波より境界面で成される仕事から定式化することができる。モデル底部に粘性境界を設定する事により、上昇波のみによる解析を実施することができる。	解析領域の境界変位とフリーフィールドの境界変位の差に等価な力で表面波(レーリー波、ラブ波)を吸収する。表面波の波数に関する固有値解析を実施する必要がある。モデル底部を剛体基盤で仮定する為、底部の半無限性を考慮することが困難。	弾性波理論に基づく。2つの境界条件(ノイマン条件、ディリクレ条件)に対する解が逆位相となることに着目し、これらの平均をとることで反射波を消去する。問題の次数をnとすると、 2^n 個の解を重ね合わせる必要がある。	解析領域をFEMで、半無限領域を境界要素法で定式化。FEM領域と境界要素領域の境界における変位が等しいことにより、両手法を結合させる。
概念	<p>粘性境界</p> <p>FEM領域</p> <p>地震波</p>	<p>伝達境界</p> <p>表面波</p> <p>FEM領域</p> <p>地震波</p>	<p>FEM領域</p> <p>ノイマン条件</p> <p>ディリクレ条件</p> <p>地震波</p>	<p>FEM領域</p> <p>BEM領域</p> <p>地震波</p>
解析領域	時間領域	周波数領域	時間領域	周波数領域
解析ケース数	少ない	少ない	多い	少ない
機能追加に伴う作業量	中	大	中	大

3. 無限粘性境界の導入と検証解析

3.1 はじめに

前章の文献調査結果に基づき、人工バリアの地震応答解析モデル／コードの改良を行った。前記のとおり、ニアフィールド周辺岩盤のモデル化に伴う境界処理機能として、地盤の半無限性を考慮する粘性境界の導入と関連する諸解析機能の導入を行った。ここでは、解析コードの改良に伴う機能概要と、解析コードの検証解析結果の概要について記載する。

3.2 粘性境界要素の導入

前章の文献調査で得られた成果に基づき、3次元地震応答解析コードへの粘性境界要素の導入と、これを用いた諸解析機能の導入を行った。解析コードの改良に関する理論的事項および粘性境界の定式化については、成果報告書の付録Aに収録した。本改良により、以下の解析が可能となった。

- ① 散逸波の吸収を考慮した動的応答解析
- ② 上昇波入力による動的応答解析
- ③ 入射波の直進性を保証した動的応答解析

①の散逸波の吸収は、解析領域境界に粘性境界要素を設けることで考慮することができる。②の上昇波入力による解析は、これまで全節点に慣性荷重として与えていた地震力を、解析領域の底面のみに与えることで考慮することができる。これらを考慮することで、地盤の半無限性を表現しつつ、鉛直下面から伝搬してくる上昇波のみによる解析(入射波解析)を行うことができる。一方、③の入射波の直進性については、解析領域の側面に設けた粘性境界とともに、フリーフィールド単体モデルの事前解析結果を用い、側方境界に人為的な境界力を与えることで考慮することができる。

3.3 検証解析

3.3.1 検証方針の検討

本解析コードに新規に導入した2次元および3次元の無限粘性境界要素について、機能検証を行った。昨年度までは、文献調査等により過去の解析事例を収集し、これと同等の解析を行い文献記載値との一致を確認することで、コード機能の妥当性を示してきた。しかしながら、検証の対象となる機能が複雑多岐になるにつれ、比較しようとする解析で用

いられた実験パラメータ、荷重条件および物性値などの諸条件が全て文献に明記されているとは限らない。そこで、本年度は、解析結果を定量的に解釈することのできる簡易モデルによる検証を行うとともに、類似機能を有する他のコードとのベンチマーク解析を行い、改良コードの妥当性を多角的に検討することとした。一例として、動燃殿所有の SIGNAS コードを用いて実施したベンチマーク解析結果の概要について示す。

3.3.2 ベンチマーク解析による検証

本検証では、解析領域内部からの散逸波が、遠方半無限領域に散逸していく現象を正しく模擬しているか。すなわち、本作業で導入した粘性境界が、散逸波を反射することなく、精度良く吸収しているか否かをベンチマーク解析を通じ確認する。これは、解析領域内部の一節点に、インパルス的な外力を作用させ、解析領域内での自由応答(変位、速度、加速度)波形を見ることで判断することができる。粘性境界が正しく機能していれば、境界の反射波による自由応答の攪乱は生じない。

本ベンチマーク解析では $8 \times 8 \times 4$ 個の 3 次元ソリッド要素から構成される地盤モデルを用い、動燃事業団殿所有の有限要素法による総合地盤解析コード「SIGNAS」とのベンチマーク解析を行った。

ベンチマーク解析の結果を図 3.3.2-1～図 3.3.2-3 に示す。荷重は 0.5sec で最大値をとり 1.0sec でゼロとなるインパルス的な節点外力として自由表面上の 1 節点に作用させており、この点に於ける変位、速度、加速度の系時変化を周辺固定境界および周辺粘性境界の場合で比較した。入力波は 0.5sec をピークとし、1.0sec でゼロとなるインパルス的な荷重であるため、これ以降の波形の攪乱は境界に於ける散逸波の反射によるものと考えてよい。1.0sec 以降の波形を見ると、周辺固定条件に比較し粘性境界の場合は、反射波による波の攪乱が低減されることが確認できる。また、SIGNAS コードの解析結果とも良好な一致を示している。しかしながら、周辺粘性境界の変位波形を見ると、若干の残留変位を確認することができる。これは、周辺境界を全てダッシュポットで支持したことによる影響と考えられる。この影響を回避するためには、モデル化領域をある程度大きくとる等の対応策が報告されている(三浦、沖中 1989)。

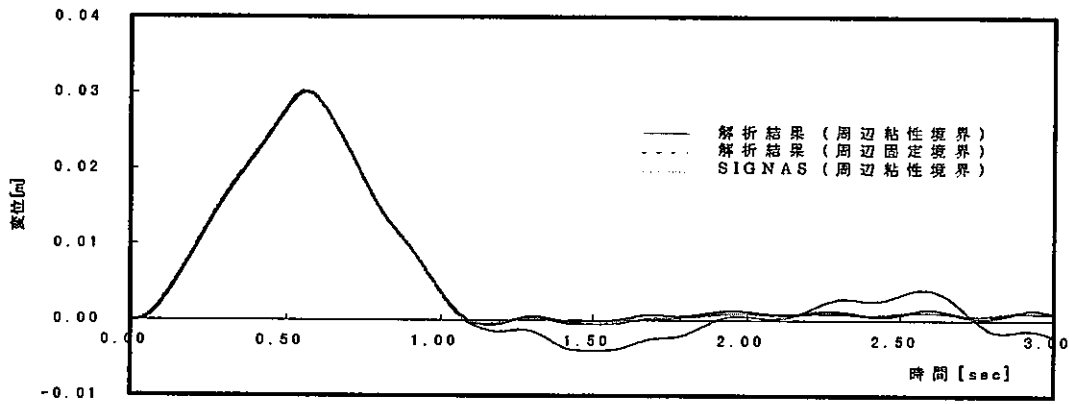


図 3.3.2-1 節点荷重に対する応答変位

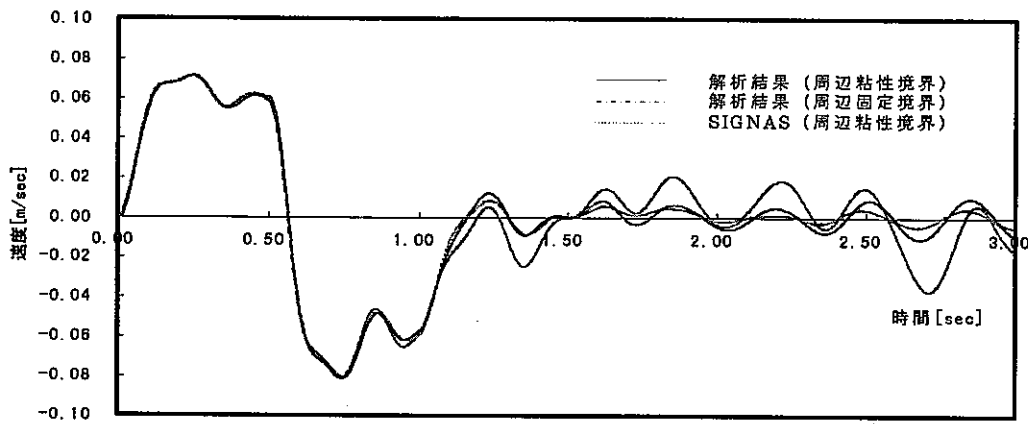


図 3.3.2-2 節点荷重に対する応答速度

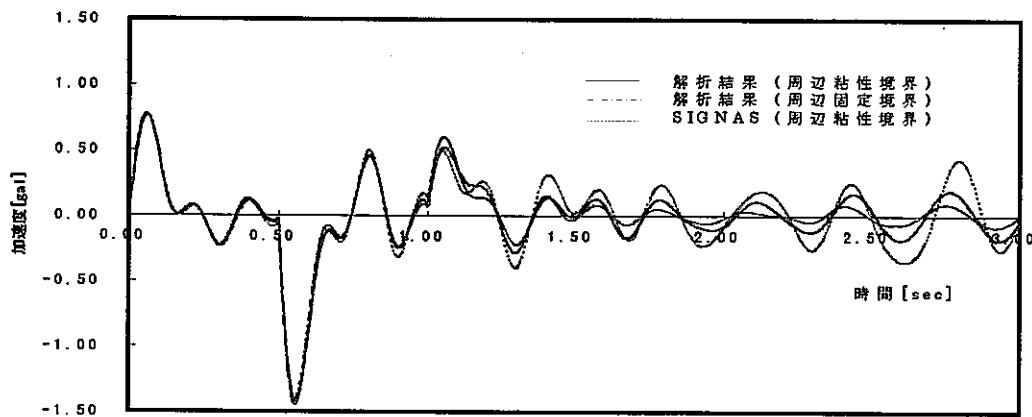


図 3.3.2-3 節点荷重に対する応答加速度

4. 振動実験に基づくモデル／コードの妥当性評価

4.1 はじめに

H 7年度に引き続き、防災科学技術研究所殿（以下、防災研殿）に於いて大型振動試験装置による人工バリアの振動実験（1 / 5 スケール供試体）が行われた。本研究では同振動実験に対する事前の情報提供を目的に予備解析を実施した。

また、昨年度に実施した実験解析の諸条件を再検討した結果、防災研殿で実施した振動実験結果と解析結果の間に差異がある事がわかった。ここでは、その原因を定量的に考察し、実験結果を再現する方策について具体的に検討した。

4.2 予備解析

本年度は、乾燥密度を実際の処分環境に近づけたベントナイトを用いて人工バリアの振動実験を行う。本試験装置では、固有周期が 50Hz を超える可能性がある供試体に対して、スイープ試験等からこれを計測することは困難とのことである。従って、解析により事前に固有周期を推定し、ベントナイトの乾燥密度をどの程度まで大きくすることができるかを検討した。

その結果、ベントナイトの乾燥密度が 1.0g/cm^3 の場合、いずれの解析ケースも固有周期が 50Hz を超過していることがわかった。H 7年度（乾燥密度 0.7g/cm^3 ）の固有値解析結果が約 36Hz であることを考慮すると、供試体の密度の増加に伴い固有周期が増大したものと解釈することができる。これより、本供試体の固有周期を、大型振動実験装置を用いたスイープ試験から測定することは困難であること確認された。

さらに、ここではベントナイトの乾燥密度を 0.7g/cm^3 とした昨年度の解析結果と、仮にこれを 1.0g/cm^3 とした場合について、ベントナイトの乾燥密度の相違による動的応答解析結果に及ぼす影響について予備解析を実施した。入力地振動は前年度と同様、エルセントロ波を用いた。

図 4.2-1 に動的応答解析結果の一例を示す。評価点は、オーバーパック上の点（節点 3）、オーバーパックと容器の径方向の中間点（節点 5）、オーバーパックと容器の長手方向の中間点（節点 57）の計 3 点であり、同図はオーバーパック上の点に於ける応答加速度に関するものである。これより、双方の応答性状は大きく異なっており、ベントナイトの乾燥密度の相違に伴う応答解析結果への影響は大きいと考えることができる。しかしながら、両ケースではベントナイトの乾燥密度の相違に伴い、せん断弾性係数および減衰定数も大きく異なっている。解析結果の相違は、むしろこれらの因子に起因すると考えられる。

4.3 H7 実験データ解析結果の考察

図 4.3-1 に H7 年度に得られた実験データ解析結果の一例を示す。これは、エルセントロ波を用いた際の動的応答解析結果（節点番号 3）を相対加速度のフーリエスペクトルで整理したものであり、ベントナイトの減衰を 2.5%、20%とした場合を併記したものである。これより、ベントナイトの動的試験で得られた減衰 2.5%を利用した場合は、実験結果と解析結果が大きく異なっており、30Hz 近傍でのフーリエ振幅が突出していることが確認できる。そこで、減衰比をパラメータに数ケースの感度解析を行った結果、ベントナイトの減衰を 20%程度とすれば過大な振幅を抑制することができ、実験結果と比較的一致することが判った。しかしながら、ベントナイトの減衰を独立に変更することに物理的な意味はなく、本来であれば、減衰と連動するパラメータ（例えば、せん断剛性）も変更しなければならない。したがって、振動実験が行われた系で、何らかの減衰効果が作用している可能性が予測できる。

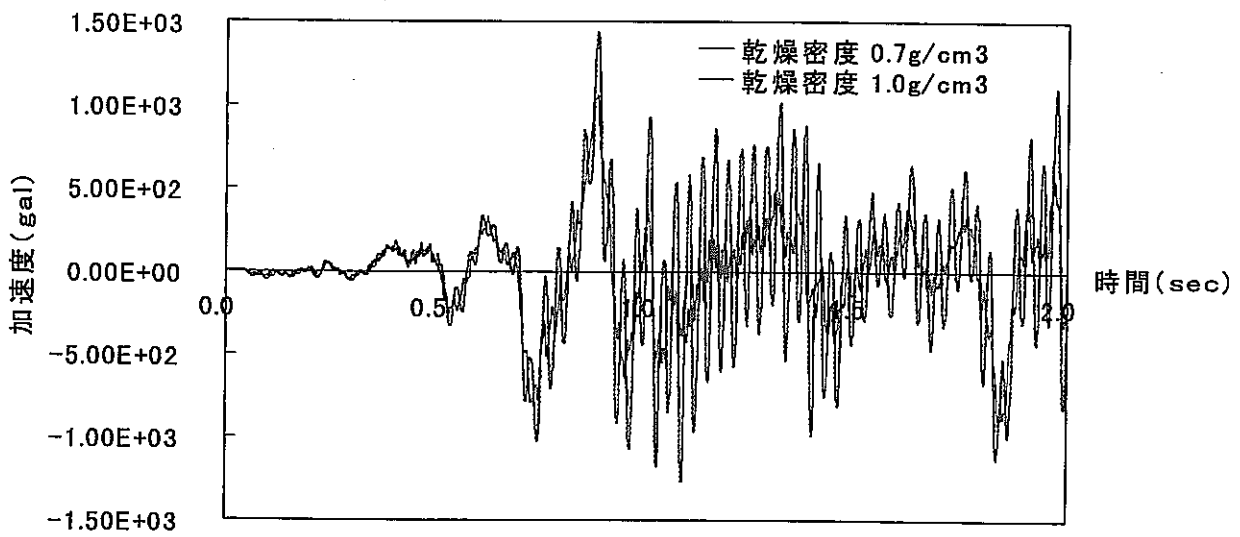


図 4.2-1 ベントナイトの乾燥密度の相違による影響
(オーバーパック上の点、絶対加速度)

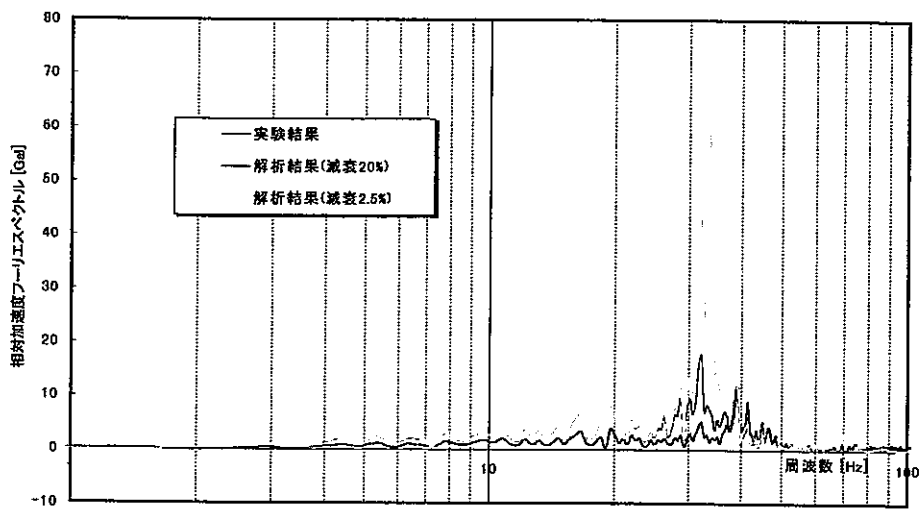


図 4.3-1 ベントナイトの減衰比による影響
(H7年度振動実験データ解析、相対加速度フーリエスペクトル)

5. 実処分場を想定したニアフィールド耐震安定性評価検討

5.1 はじめに

実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価を目的とし、処分環境下に於ける FEM モデルの構築ならびに廃棄体の定置方式の相違に着目したパラメータ解析を行った。

5.2 解析ケースの選定

波動伝搬問題に於いて、モデル化領域を決定するには入力する波の波長成分との関係を十分配慮の上設定することが重要となる。通常、モデル化すべき範囲としては、注目している評価範囲よりできるだけ遠くに設定し、境界の影響を受けないようにすることが望ましいが、計算自由度の増大等に伴い作業効率の低下が大きな負担になる。これまでに、モデル化範囲に関する既往の研究成果が幾つか得られているが、これらは対象とする地盤や地盤上あるいは地盤中の構造物等の状況に応じて適時設定すべきものである。そこで、本パラメータ解析では、第 2 章で得られた文献調査の成果を参考にモデル化範囲の基準ケースを定め、これらの変動に対するパラメトリックな地震応答解析を実施することとした。ただし、ここで言うモデル化範囲とは、ベントナイト上部の岩盤距離 H_T ならびにベントナイト下部の岩盤距離 H_B を示すものとする。なお、ニアフィールドをモデル化するに当たりここで与えられていない諸条件の設定に関しては、動燃事業団殿の概括的性能評価レポート(PNC TN 1410 92-081、以下「H3 レポート」と称する)記載の処分場条件より設定した。

解析ケースは、処分坑道横置きの場合と処分孔縦置きの場合、ならびに比較参照用の固定境界の場合を含む全 12 ケースで構成されている。いずれの解析ケースも、注目している振動成分の波長の最大値 λ_{\max} を尺度にモデル化範囲 H_B, H_T を表現した。

5.3 解析条件

実処分場を想定したニアフィールドのモデル化方針を検討し、本パラメータ解析における諸条件を下記のとおり設定した。

(a) 材料物性値

ニアフィールドの場を規定するガラス固化体、オーバーパック、ベントナイトおよび岩盤の諸物性値を H3 レポートに基づき設定した。ただし、ガラス固化体のヤング率、ポアソン比については同レポートに記載がないため、機械工学便覧よりガラスの値で代

用した。また、岩盤の物性は、地震波の伝搬特性（S波速度、P波速度など）を規定するため、本解析で用いる入力地震波と媒体の物性値の間に矛盾が生じないように、実際の観測地点付近で測定された値を採用した。

(b) 入力条件

実際の処分環境で想定される地下深部の地震波の1つとして、動燃事業団殿の釜石サイトで観測された岩手県沿岸南部地震の観測波（NS成分）を採用した。ただし、注目している系の応答特性を明瞭にするため、同地震波の最大値（-14.6Gal）を1000Galに規格化したものを使用する。なお、加振方向は処分坑道横置きと処分孔縦置きの場合で、ニアフィールドの応答性状の相違を共通に議論するため、処分坑道の軸方向で同一とし、解析モデル底部の岩盤境界から水平に加振するものとした。

(c) モデル化範囲

上記の入力条件ならびに周辺岩盤を除く人工バリアの固有値解析結果に基づき、本パラメータ解析でモデル化すべき範囲、すなわち人工バリアの上下方向に広がる岩盤領域の距離の基準値（ H_B, H_T ）を検討した。その結果、 $H_B = H_T \approx 15[m]$ を基準値として採用できることが判った。また、人工バリアの側方領域（前後左右）のモデル化範囲については、隣接するオーバーパック間のピッチを目安に設定した。なお、本解析ではモデル幾何形状ならびに荷重条件の対称性を仮定し、1/2対称モデルを採用することとした。

(d) 境界条件

地盤の半無限性を考慮するため、周辺岩盤の外側境界に粘性境界を設けた。ただし、坑道軸方向の境界に関しては、オーバーパックが等間隔で周期的に配置されることを仮定し多点拘束条件とした。これにより、横方向境界では拘束したことによる反射波が存在することになるが、この反射波は隣接する領域からの透過波と解釈すること可能となる。このとき、処分坑道の軸方向の長さは無限長を仮定しており、坑道両端の影響を全く受けない中心近傍の一区画を想定している。また、坑道軸と直交する方向の境界に関しても粘性境界を設けた。

(e) 初期条件

前記のとおり、ベントナイトの膨潤圧のみを初期応力として考慮する。ここでは、ベントナイトを構成する各要素に対し等方的に作用させることとした。

5.4 解析結果の概要

(a) 粘性境界要素を導入したことによる効果確認

処分坑道横置きおよび処分孔縦置きの各ケースについて、周辺境界条件を固定境界あるいは粘性境界とした場合の加速度モードを比較した。これより、廃棄体の定置方式に係わらず固定境界とした場合は、地震荷重が全節点に慣性力として作用するため、モデル全体が剛体運動となることが確認できた。また、粘性境界を用い上昇波による解析を行った場合は、モデル下方から入射した地震波が上方から散逸していく様子が確認できた。これより、本年度導入した粘性境界要素ならびに関連する諸解析機能は正しく機能していることが確認できた。

(b) モデル化すべき範囲の概略的把握

底部モデル化範囲 H_B 、上部モデル化範囲 H_T の影響を比較した。これにより、周辺岩盤を除く人工バリアに注目した場合は、廃棄体の定置方式に依らず H_B あるいは H_T の相違による応答性状への影響はほとんどないことが確認できた。従って、本解析に類似した条件の範囲では、 $H_B=H_T=7.5\text{m}$ 程度モデル化すれば十分であり、本パラメータ解析で設定した基準ケース ($H_B=H_T=15\text{m}$) よりも効率的なモデルを用いることが可能である。

(c) 廃棄体の定置方式の相違による影響把握

処分坑道横置きおよび処分孔縦置きの解析結果を比較した。これより、廃棄体の定置方式の相違による地震応答性状への影響は、処分孔縦置きの場合で緩衝材部分に発生するせん断ひずみに若干の差異がある以外は、概ね同様の傾向を示していることが確認できた。

(d) 実処分場を想定した耐震安定性の評価

ニアフィールドの耐震安定性を概略的に考察した。これより、ニアフィールドでせん断破壊が生じている可能性が少ないこと、また、ベントナイトの応力緩衝性が確保されていることを視覚的に確認することができた。なお、これまでの振動実験で示唆されてきた人工バリアの剛体挙動も、改めて確認することができた。

6. 今後の課題

本年度の研究では、実処分場を想定したニアフィールドの耐震安定性評価に焦点を当て、処分環境における入力地振動の調査、解析コードの実用化への対応（無限粘性境界要素の導入）ならびにニアフィールドパラメータ解析を実施し、動燃殿の第二次取りまとめレポートの作成に向けた予察的な知見を得ることができた。以下に本研究を通じ得られた今後の課題について整理する。

① 地中の地震波に関する調査検討

人工バリアの地震応答解析に資する入力地震動の設定を念頭に、地下深部の地震観測事例に関する調査検討を行った。これにより、地下数百メートルに於ける観測事例は極めて少ないことが明らかになった。しかしながら、下総、府中および岩槻の深層井では、2000m～3000m級の観測事例があることが分かった。これらの観測波は、地下深部における地震波の何らかの特性を含んでいるものとして、El-Centroや宮城沖などの過去の著名地震波と同等の扱いで利用することが可能と考える。また、これまでに得られている表層の地震波から、地下深部の地震波を推定する手法に関して調査・整理した。これらの手法は、表層の観測点から注目している深度までの地盤特性（弾性波速度、密度など）を必要とするため、これらのデータが整備されていることが前提となる。また、地盤を均質弾性媒体と仮定している等の手法に関する前提条件を加味すると、現実的かつ保守的な推定結果と成り得るかの十分な検討が必要であろう。

② 地震応答解析モデル／コードの開発

地盤の半無限性を考慮することを念頭に、本研究で開発中の解析コードに無限粘性境界を導入した。これにより、解析領域内部から遠方地盤への散逸波を考慮した地震応答解析が可能になり、実際の処分環境をより現実的に取り扱えるように成った。今後は、ベントナイト中のオーバーパックの移動、沈下あるいはベントナイトーオーバーパック間あるいはベントナイトー岩盤間などのすべり・剥離を考慮した解析など、実処分場をモデル化する上での高度化が必要となろう。しかしながら、解析コードの機能拡張は、処分環境で想定され得る様々なシナリオとそれらの優先順位を考慮しつつ、検討していくことが重要である。

③ 振動実験に基づくモデル/コードの妥当性検討

解析結果と 1/5 スケール人工バリアの振動実験結果との間に見られた相違は、感度解析を通じベントナイトの減衰の影響であることが確認できた。しかしながら、減衰比のみを独立なパラメータとして感度解析を行うことに物理的な意味はなく、本来であれば、減衰の増大に伴う剛性低下も同時に考慮すべきである。したがって、実験系で何らかの減衰効果が作用した可能性が実質的な原因として考えられる。ベントナイトの動的試験データを取得した供試体と振動実験で用いているベントナイトが同一条件下のものか、あるいは人工バリアの据付けで不備な箇所はないか等の観点から、現コードで採用しているモデルの確証を前提とした基礎データ取得実験が必要である。

④ 実処分場を想定したニアフィールド耐震安定性の評価検討

これまでに得られている既存の諸情報に基づき、実処分場を想定したニアフィールドの地震応答解析を実施し、モデルならびに解析・評価に関する知見の収集を行った。これらは、人工バリアの耐震安定性評価に資する希少な情報として蓄積していくとともに、第 2 次取りまとめのレファレンスケースの解析に着実に反映させていくことが重要である。以下に、本評価検討を通じて得られた課題についてまとめる。

(a) 地震応答解析コードの実用化への対応

本年度のコード改良により、地盤の半無限性を考慮した現実的な解析が可能になった。しかしながら、地震荷重による破壊（たとえば、剥離、すべり等）の有無など構造上の健全性評価、あるいはニアフィールドの岩盤中に想定する不連続領域には対応することはできない等の実用化への対応には課題が残った。したがって、岩盤中のき裂をモデル化すると同時に、土質材料の破壊挙動が表現可能なジョイント要素の導入が候補として考えられる。今後は、ジョイント要素の制約条件等を考慮の上、本地震応答解析コードへの導入を検討するべきである。

(b) 隣接する処分坑道の影響

本年度の解析では、処分坑道の軸方向の周期対称性は考慮（すなわち、同一坑道中の隣接するオーバーパックを考慮）しているが、平行に隣接する他の処分坑道を含めた周期対称性については考慮できていない。これは、軸方向の周期対称性と同等の扱いで考慮可能ではあるが、解析モデルを全周モデルとして扱わなければならないため、モデルの規模が相当に大きくなることが予測される。これらの周期対称性を考慮するためには、効率的かつ現実的な解析モデルの検討が必要となる。

(c) 初期条件の設定

初期条件は、想定する処分環境の状態（操業時、処分時、閉鎖後など）に依存するものであり、それぞれの状態に於ける様々な現象を勘案して設定しなければならない。本年度は、解析コードの制約などから周辺岩盤の初期応力は設定していない。今後、他のコードにより周辺岩盤の初期応力を求めるなどの対応が必要である。また、本年度は検討の対象としなかった 2 相系解析の必要性を考慮するとともに、初期間隙水圧の設定等も検討する必要がある。

(d) 入力地震動の設定

本年度の解析では、動燃殿の釜石サイトで観測された比較的深部の実地震波を利用した。今後、様々なサイト特性を想定した解析を行うにあたっては、すべての場合に深部地震波が観測されているとは限らない。本年度の文献調査で整理した、表層地震波から深部地震波を推定する手法（第 2 章参照）を利用するなどして対処すべきである。

7. あとがき

動燃事業団殿の第二次取りまとめレポートの作成に向け、限られた時間的制約の下で最大限の知見を得る必要がある。したがって、本年度より開始した実規模想定耐震安定性評価に於いても、基本事象に対する理解を深めるとともに、耐震安定性に関与する重要事象を早期に見極めることが重要である。このことは、やみくもに詳細かつ高精度のモデル化を行うことではなく、実際の物理現象の再現性を損なわない範囲で、より簡易なモデルあるいは手法を用いた合理的な評価を行うことにつながる。

本研究では、今年度の成果により実処分場を想定した耐震安定性の解析・評価を行える見通しを得た。今後は、上述の重要事象の絞り込みを図りつつ、解析コード/モデルの開発ならびに人工バリアの耐震安定性評価を展開することが肝要である。

8. 参考文献

- － 坂本義昭、妹尾宗明、他(1996)「TRU 廃棄物処理場への人間侵入の観点から見た地下構造物深度分布調査」
- － 木下 繁夫(1986)「深層井観測により推定された厚い堆積層の地震応答特性」
- － G.N.Owen、R.E.Scholl(1981)「Earthquake Engineering of Large Underground Structures」
- － 奥村光男、多田 和美、他(1982)「地盤－構造物系の相互作用解析における底面粘性境界の有効性について」
- － 奥村 光男、多田 和美 他(1982)「地盤－構造物系の相互作用解析における一手法」
- － W.D.Smith(1974)「A Nonreflecting Plane Boundary for Wave Propagation Problems」
- － P.A.Cundall、R.P.Kuniar 他(1978)「Solution of Infinite Dynamic Problem by Finite Modeling in the Time Domain」
- － T.Suzuki、M.Hakuno(1985)「Dynamic Analysis of Ground Motion by FEM with Non-Reflecting Boundary」
- － K.Goto、M.Matsumoto(1985)「Earthquake-Resistance Analysis by Finite Element-Boundary Element Hybrid Method」
- － 三浦 房紀、沖中 宏志(1989)「仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた三次元構造物－地盤系の動的解析手法」
- － 川本、林 正夫(1978)「地盤工学における有限要素解析－地質力学と岩盤力学へのアプローチ」
- － 動力炉・核燃料開発事業団(1992)「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 -PNC TN 1410 92-081-」