

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発

－ 概要版 －

(動力炉・核燃料開発事業団 研究委託内容概要)

1998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

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発

森 康二*¹ 根山敦史*¹
田中由美子*² 西村和哉*²

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目的に、動燃殿で整備している仮想地質モデル情報に基づく地中地震波の推定を行った。
- (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。本年度は地盤中あるいは地盤と構造物間の不連続性を考慮するジョイント要素の追加を行った。
- (3) 改良したコードの妥当性を確認するため、ジョイント要素の基本的な変形モードの確認ならびに汎用有限要素解析コード SOLVIA を用いたベンチマーク解析を行った。
- (4) 1/2.5スケール人工バリアの振動実験データに基づき、解析コードおよびモデルの妥当性の検討を行った。
- (5) 第2次取り纏めに向けたレファレンスケースの諸条件を用いたニアフィールドの地震応答解析を行い、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 : 090D0228

事業団担当部課室及び担当者 : 環境技術開発推進本部処分研究グループ
長谷川 宏

*1 環境工学応用推進グループ

*2 サイエンス・シュミレーション応用推進グループ

Development of the Earthquake Resistance Evaluation Methodology for the Engineered Barrier System

Koji Mori*¹ Atsushi Neyama *¹
Yumiko Tanaka*² Kazuya Nishimura*²

Abstract

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

- (1) Due to evaluate the earthquake resistance under the real repository system, we have estimated the underground seismic wave in the virtual geological model which is now studying by PNC.
- (2) An additional function was introduced to the three dimensional seismic analysis code. This year, the joint element which makes it possible to take account for the separation and sliding between soil and structure in underground was introduced.
- (3) In order to verify the improved code, the verification analysis were conducted through the benchmark analysis using the SOLVIA code.
- (4) Based on the results of vibration test for the 1/2.5 scale engineered barrier model, the validation analysis were performed to show the validity of the analysis models and code.
- (5) We have calculated the seismic response of engineered barrier system and evaluated it's earthquake resistance using some data which will be used in the second progress report in PNC.

Work performed by Computer Soft ware Development Co.,Ltd.under contract with
Power Reactor and Nuclear Fuel Development corporation.

PNC Liaison : Isolation system Research Program Radioactive waste Management
Project, Hiroshi Hasegawa

* 1 Environmental Engineering Application Promotion

* 2 Scientific Simulation Application Promotion

人工バリアシステムの耐震性評価手法の開発

目 次

項数

第1章 まえがき	1-1
第2章 地質モデルにおける処分深度での地中地震波の検討	2-1
2.1 概要	2-1
2.2 地質モデル情報に基づく深部地震波の推定	2-1
第3章 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発	3-1
3.1 はじめに	3-1
3.2 2次元、3次元ジョイント要素の導入	3-1
3.3 地震応答解析コードの検証	3-1
3.3.1 検証方針と解析ケース	3-2
3.3.2 解析条件	3-2
3.3.3 解析結果および考察	3-2
3.4 実処分場体系下に於けるモデル化手法の高度化	3-2
第4章 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性、パラメータの検討	4-1
4.1 はじめに	4-1
4.2 予備解析	4-1
4.2.1 1／2．5スケール人工バリアの実固有値解析	4-1
4.2.2 1／2．5スケール人工バリアの動的応答解析	4-1
第5章 地質モデルにおける処分場ニアフィールドの耐震安定性の評価検討	5-1
5.1 はじめに	5-1
5.2 レファレンス仕様	5-1
5.2.1 評価体系	5-1
5.2.2 入力地震動の選定	5-1
5.3 解析ケース	5-1
5.4 解析条件	5-2
5.5 解析結果と考察	5-3
第6章 今後の課題	6-1
第7章 あとがき	7-1
第8章 参考文献	8-1

表目次

表 4.2.1-1 材料物性値（実固有値解析）	4-3
表 4.2.1-2 実固有値解析結果	4-3
表 5.4-1 物性値	5-4

図目次

図 2.2-1 深度 1000m 地点における加速度波形	2-2
図 3.3.2-1 ベンチマーク解析モデル	3-3
図 3.3.3-1 ベンチマーク解析結果(すべりを生じるジョイント要素を含む場合)	3-4
図 3.3.3-2 ベンチマーク解析結果(すべりを生じないジョイント要素を含む場合)	3-5
図 4.1-1 1/2.5 スケール人工バリア振動実験モデル	4-4
図 4.2.2-1 動的応答解析に用いた正弦波	4-5
図 4.2.2-2 動的応答解析に用いたランダム波	4-5
図 4.2.2-3 正弦波入力に対する応答波形（評価点 B、境界条件 A）	4-6
図 4.2.2-4 ランダム波入力に対する応答波形（評価点 B、境界条件 A）	4-7
図 5.2.1-1 人工バリアの幾何形状（単位；mm）	5-5
図 5.4-1 解析モデル（岩盤を含まない系）	5-6
図 5.4.2-1 解析モデル（総節点数 1845、総要素数 2265；単位 cm）	5-7
図 5.5-1 緩衝材内の応答加速度（解析ケース 7）	5-8
図 5.5-2 運動モード（解析ケース 7、実線；変形前、波線；変形後）	5-9
図 5.5-3 応力分布とひずみ分布 （解析ケース 7、左図；せん断応力 τ_{yz} [kgf/cm ²]、右図；せん断ひずみ γ_{yz} [-]）	5-10

第1章 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には、ガラス固化体と地下水の接触や溶出移行の抑制など、長期間にわたる様々な物理的、化学的バリア性能が要求される。これらのバリア性能を長期維持していくためには、人工バリアシステムが健全な状態で存在することが必要である。したがって、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においては、人工バリアシステムの健全性を確実に担保するために、地震に対する人工バリアシステムを中心としたニアフィールドの耐震性評価が不可欠である。

本研究では、平成4年度より人工バリアの地震応答解析コードの開発ならびに振動実験モデル等を用いた解析作業を段階的に実施しており、昨年度までに実際の処分環境に近いモデルに基づいた耐震性評価を行える見通しを得ている。本年度は、本解析コードの更なる実用化に向けて、新たに性質の異なる材料の隙間や地盤の不連続面をモデル化する機能を導入する。また、この機能追加を行った解析コードを用いて、実処分場を想定した地質モデルを対象とし、解析に必要な入力地震波およびニアフィールド解析条件の検討を行い、人工バリアを中心としたニアフィールドの耐震性評価を行うことを目的とする。

以下に、本年度の具体的な実施内容を記載する。

1.1 地質モデルにおける処分深度での地中地震波の検討

本研究では、これまでに地下深部に於ける地震観測事例の調査ならびに地中構造物の地震応答解析事例に関する情報収集と調査作業を実施してきており、実測された地下深部での地震波データは極めて少ないことを確認している。そこで、昨年度は表層で観測された地震波より深部地震波を推定する方法論に着目した調査を行い、重複反射法を始めとする代表的な手法を整理した。

本年度は、昨年度に整理した地下深部に於ける地震波の推定手法を、実現現象への適用性の観点から相互に比較検討するとともに、仮想的にサイトを想定した場合の処分深度における入力地震波の作成を試みた。

1.2 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

昨年度は、粘性境界要素の導入および上昇波による地震応答解析機能を追加し、実用化に向けた解析コードの機能拡張を行った。本年度は、昨年度に課題として摘出された岩盤中の不連続体や構造物と地盤の接触面のモデル化を可能にするジョイント要素を新規に導入する。これにより、オーバーパックと緩衝材の接触面における不連続な変形に伴う緩衝材の有効厚さの変動量を見積もることが可能になり、性能評価側への情報提供が可能となる。また、周辺岩盤中の主要な亀裂をモデル化することが可能となり、周辺岩盤中に存在する亀裂が人工バリアに及ぼす影響を見積もることができる。

なお、作成したコードの検証は、昨年と同様に、解析結果の定性的な解釈ならびに類似機能を有する他の解析コードとのベンチマーク解析を通じて行った。

1.3 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性、パラメータの検討

本年度、防災科学技術研究所殿（以下、防災研殿）ならびに動燃殿との共同研究で実施予定の人工バリアの振動実験では、これまでの処分坑道横置きモデルから処分孔縦置きモデルへと廃棄体の定置方式が変更され、供試体の縮尺も 1/5 スケールから 1/2.5 スケールへと拡大されている。また、大きな特徴としては、緩衝材中のオーバーパックの変形挙動を観測するため、半割の可視化モデルを採用している点が上げられる。

本検討は、上記振動実験への事前情報の提供ならびに 4.2 項で開発したモデル／コードの妥当性評価と課題の抽出を目的とするものである。

1.4 地質モデルにおける処分場ニアフィールドの耐震安定性の評価検討

昨年度は、人工バリア周辺岩盤のモデル化すべき領域を、解析モデルの周辺境界に粘性境界を設けることにより、地盤の半無限性を考慮しつつ概略的に検討した。これより、ニアフィールド周辺岩盤のモデル化領域は、廃棄体の定置方式によらず、最大でも 7.5m 程度モデル化すれば、境界に於ける反射波の影響を回避できることを確認した。また、廃棄体の定置方式の相違による耐震安定性への影響を評価し、処分孔縦置きの場合に緩衝材中のせん断応力が若干増加する傾向にある以外は、有意な相違が見られないことを確認した。

本年度は、動燃殿の第 2 次取り纏めに向けたレファレンスケースの諸条件を考慮し、動燃殿で別途開発している仮想地質モデル情報ならびに 1.2 項で作成した地中地震波を用いた解析評価を行った。

第2章 地質モデルにおける処分深度での地中地震波の検討

2.1 はじめに

昨年度までの調査研究により、地下深部における地震観測事例が極めて少ないこと、ならびに表層で実測された地震波を用いて深部地震波を推定する方法論が明らかになっている。この深部地震波の推定手法に関しては、重複反射法や伝達関数を用いた手法が利用できる見通しを得ている。本年度は、動燃殿で開発中の地質モデル条件下に実際の処分場を想定した場合の地中地震波の推定を試みた。

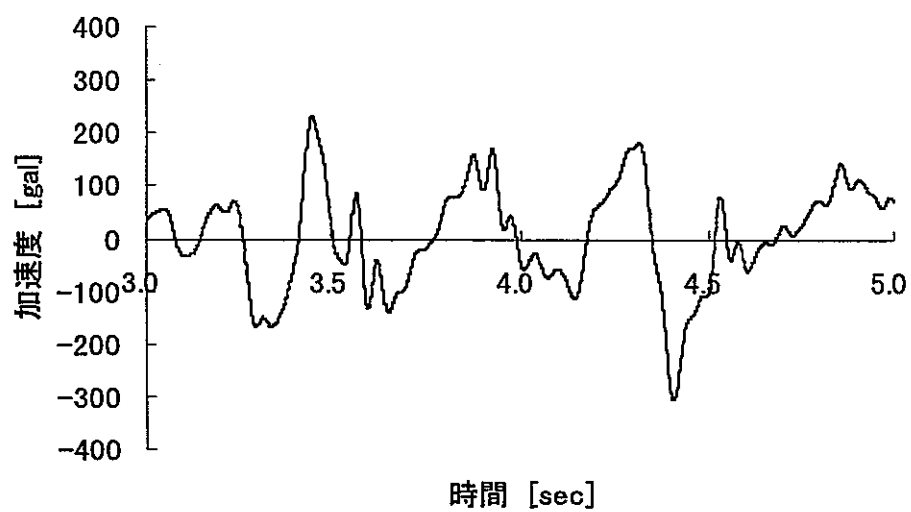
2.2 地質モデル情報に基づく深部地震波の推定

動燃殿の釜石サイトでは、重複反射理論に基づく地中地震波の推定実績があり、実測値と推定結果が良好に一致していることが確認されている。そこで、本年度は動燃殿の所有する SHAKE コードを利用し、重複反射法による地中地震波の推定を行うこととした。

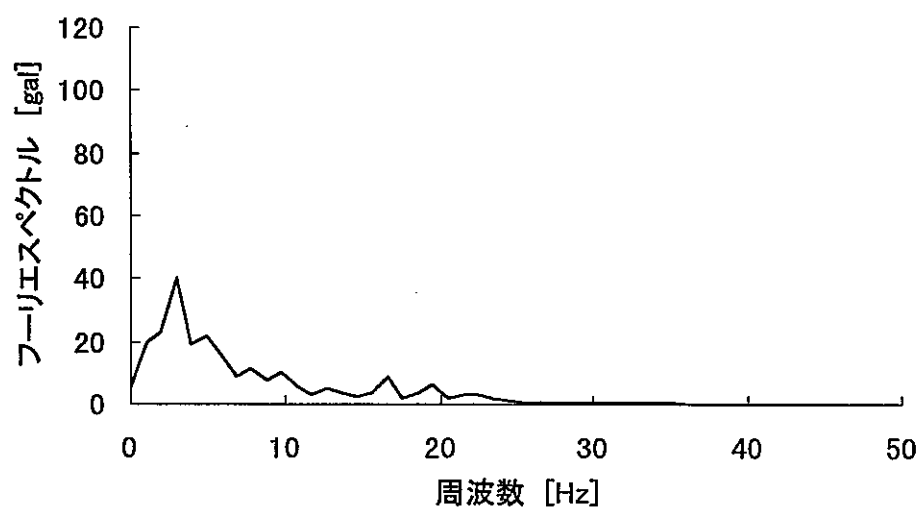
処分サイトの地質環境条件は、動燃殿で開発が進められている仮想地質モデルならびに現時点での最新のレファレンスケース条件等に基づき設定した。これらの条件は、弾性波速度の深度依存性を考慮したものであり、使用する入力波の最も短い波長を4つの層厚で近似できるよう定めたものである。

現在利用可能な表層観測記録として、これまでに使用してきた3種類の地震観測データ（エルセントロ、宮城沖、八戸）がある。各観測記録の最大加速度ならびにパワーに着目し、最も保守的な解析を行うものを選定した結果、本年度の検討ではエルセントロ波を用いることとした。ただし、神戸震災時の最大加速度値を目安に、最大値を1000galに規格化した波を用いることとした。

図2.2-1に地下1000mにおける計算結果を示す。これより、表層で最大加速度1000galの地震波は、地下1000m地点で最大200gal程度の地震波が増幅されたものと解釈することができる。ここで得られた地下1000m地点での加速度波形は、後述の実処分場を想定した地震応答解析（第5章）で入力地震動として使用する。



(a) 加速度波形



(b) フーリエスペクトル

図 2.2-1 深度 1000m 地点における加速度波形

第3章 人工バリアの地震応答解析モデル／コードの開発

3.1 はじめに

これまでに本研究の一環として開発してきた地震応答解析コードを対象に、昨年度に優先課題として挙げられた地盤の不連続性をモデル化する機能を追加導入する。改良したコードの検証は、不連続面の挙動に対する定性的解釈、ならびにこれまでに十分検証がなされているものと考えられる汎用有限要素解析コードを用いてベンチマーク解析を通じて実施する。また、昨年度に実処分上を想定し作成したニアフィールドパラメータ解析モデルに関して、注目している廃棄体の周囲に隣接する全ての廃棄体の影響を考慮する方策について検討し、昨年度版モデルの高度化を試みる。ここで検討したモデルは、後述の耐震安定性の評価検討（第5章）で利用するものとする。

3.2 2次元、3次元ジョイント要素の導入

3.2.1 ジョイント要素の定式化

ジョイント要素の変形特性、すなわち節点力と節点変位を規定する剛性マトリクスを Goodman 等の手法に基づき導出した。本定式化は、要素内に貯えられた全ポテンシャルエネルギー最小にするエネルギー停留の原理に従ったものである。

3.2.2 改良内容

本年度の改良作業では、入力データ読み込みルーチン「CARDIN」ならびに動的応答解析メインルーチン「DYNMI4」が改良の主な対象となる。

ジョイント要素は1相系要素としてのみ導入するが、2相系材料を想定した際の他の要素と併用した2相系解析にも対応できるよう作成している。ジョイント要素の導入に伴う解析コードの主な変更箇所は以下のとおりである。

- (a) 入力データの読み込み
- (b) 要素マトリクスの作成・登録
- (c) 要素応力の計算
- (d) 等価節点力の計算
- (e) 解析結果の出力

3.3 地震応答解析コードの検証

3.3.1 検証方針と解析ケース

新規に導入したジョイント要素の変形挙動が正確に表現できることを確認するため、2次元および3次元の単一のジョイント要素に対し、独立な外荷重を与え、基本的な変形モード（開口、すべり、回転）が再現できるかを確認した（運動モードの確認）。また、汎

用有限要素解析コード SOLVIA を用いて、幾分現実的なテストケースを想定したベンチマーク解析を実施した。

3.3.2 解析条件

図 3.3.2-1 にベンチマーク解析で使用するモデルと入力地震波（エルセントロ波）を示す。ジョイント要素等の物性は、それぞれのケースでジョイント要素の変形挙動が容易に確認できるように定めた。

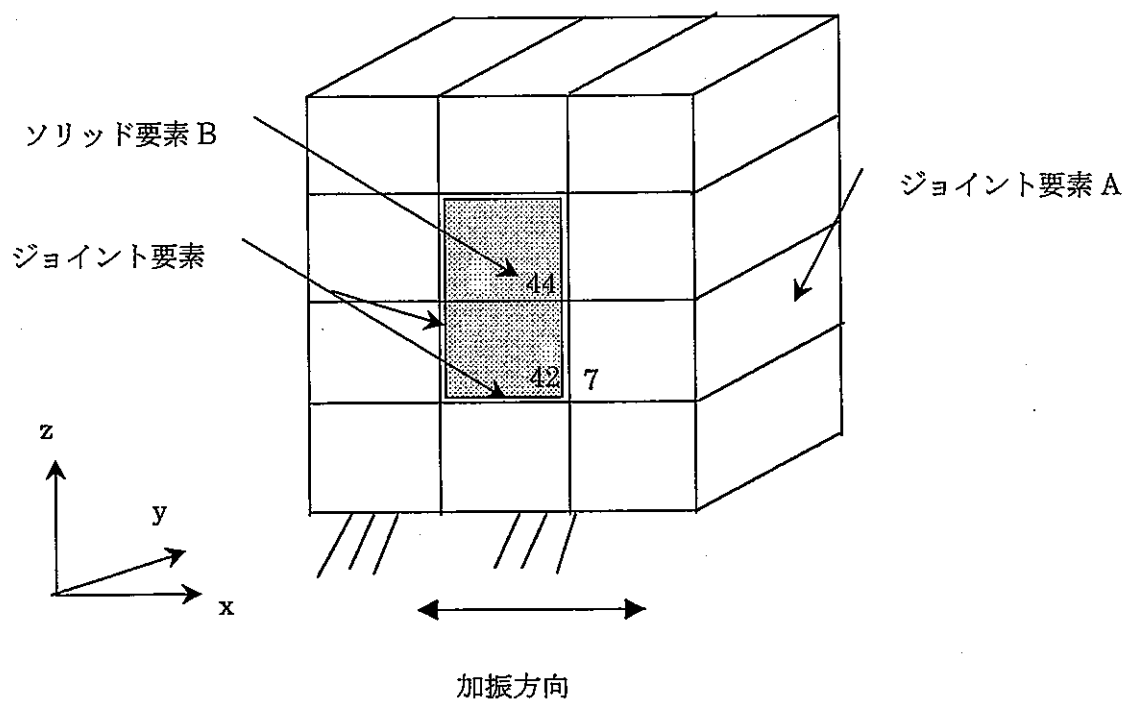
3.3.3 解析結果および考察

図 3.3.3-1 に節点 7、42 の応答変位波形（a 図、b 図）および要素 202 のせん断応力波形（c 図）を示す。節点 7 では SOLVIA の解析結果と概ね一致しているものの、ジョイント要素を構成している節点 42 では大きく異なっていることが確認できる。また、同図 c では降伏に達するせん断応力は両コードで一致しているが、波形の周期が大きく異なっていることがわかる。これらの相違がジョイント要素のすべり変形に伴うものであるかを確認するため、ジョイント要素に初期応力を与え、すべりを抑制する条件下で再度解析を行った。図 3.3.3-2 に示す結果は、前述と同一の節点および要素における応答波形である。これらの結果より、ジョイント要素ですべりが発生していない場合は、両解析コードは概ね一致した結果を与えることがわかる。

3.4 実処分場体系化に於けるモデル化手法の高度化

昨年度に作成したニアフィールド解析モデル（処分坑道横置き、処分孔縦置き）では、境界に於ける反射波の影響が小さくなるようにモデル化範囲を設定した。また、周辺岩盤の外側境界には、地盤の半無限性を考慮するための粘性境界を設けた。ただし、加振方向の境界に関しては、廃棄体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て定めた。これは、拘束したことによる反射波を隣接する領域からの透過波と解釈することを可能にするためである。

隣接する廃棄体の影響は、加振方向のみならず加振方向と直行する方向も併せて設定する方が自然である。従って、本年度は上述の前後方向の境界に関して、隣接する廃棄体の影響を考慮したモデルに拡張した。



全ての節点は、加振方向のみ自由。
各 z 断面で多点拘束条件を使用。

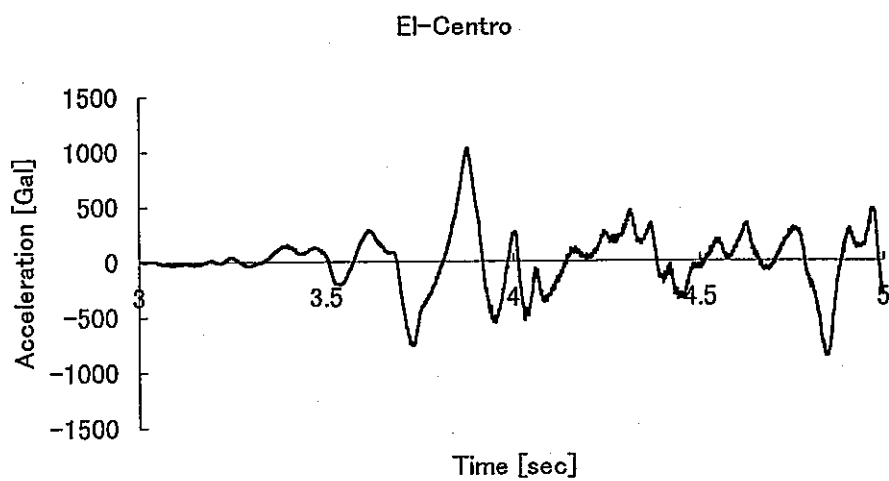
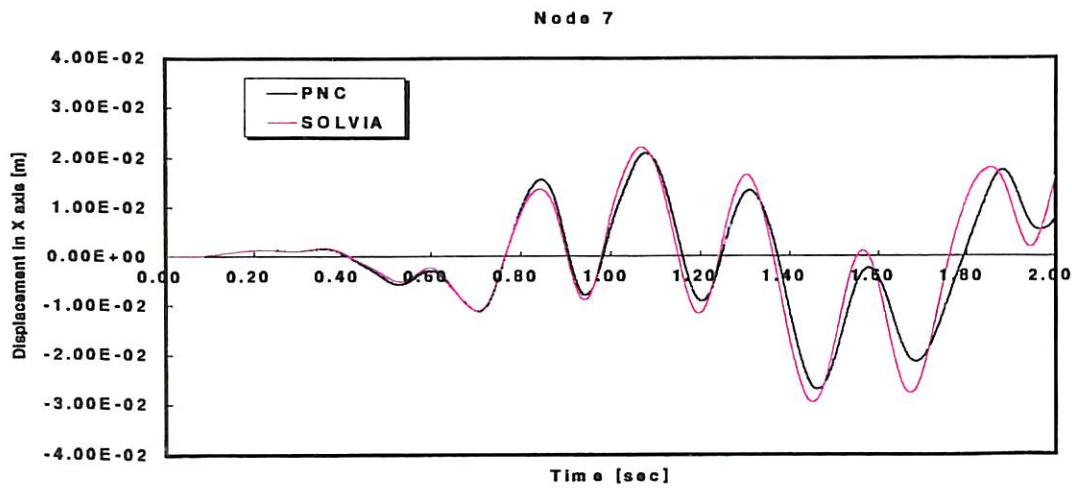
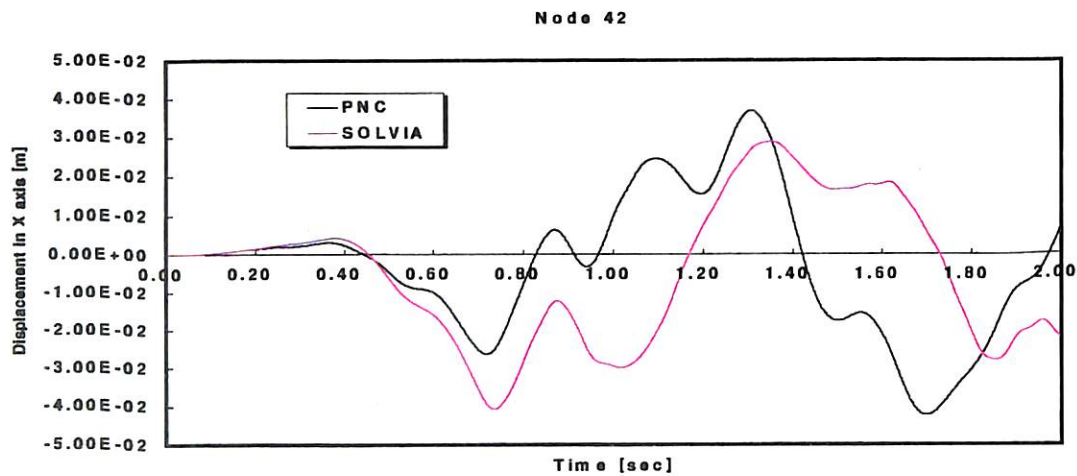


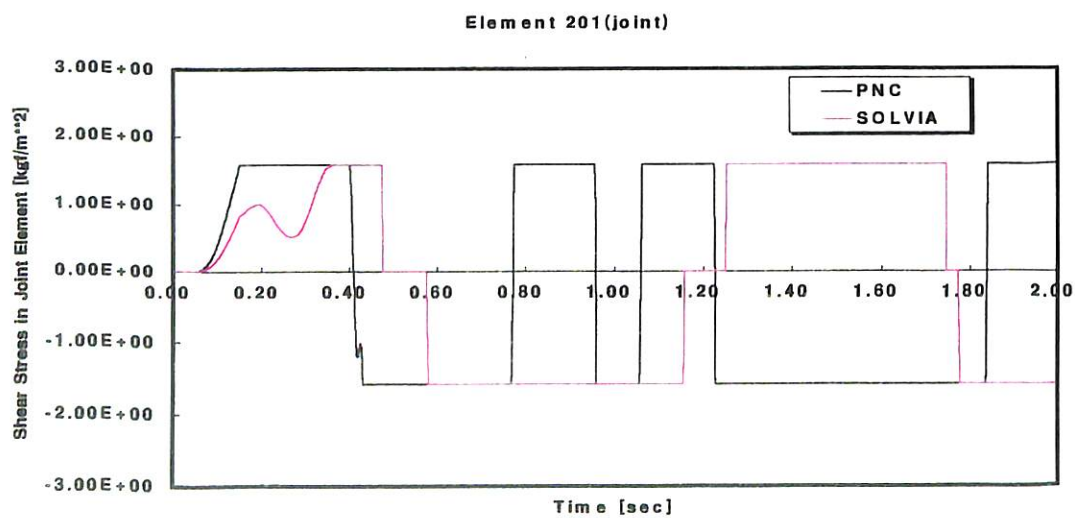
図 3.3.2-1 ベンチマーク解析モデル



(a) 加振方向の応答変位；節点番号 7

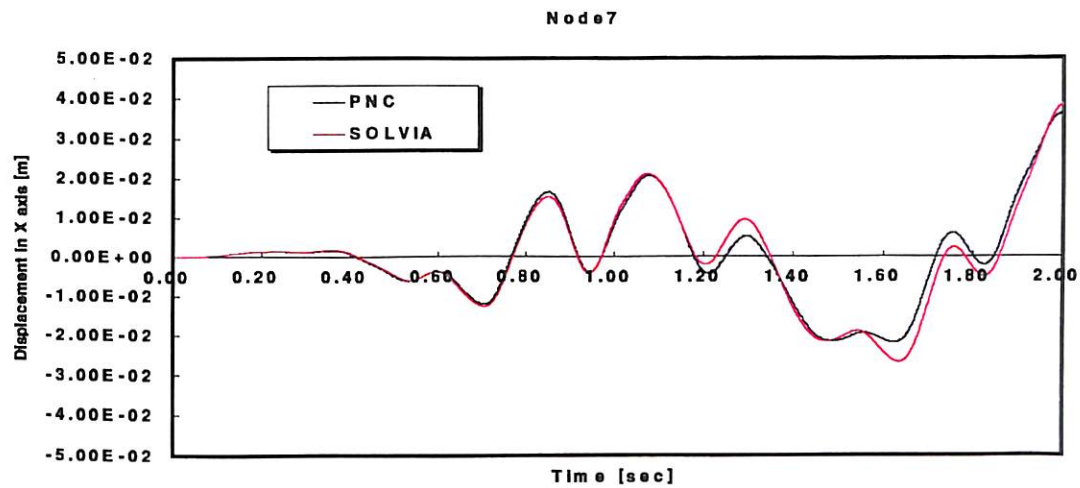


(b) 加振方向の応答変位；節点番号 42

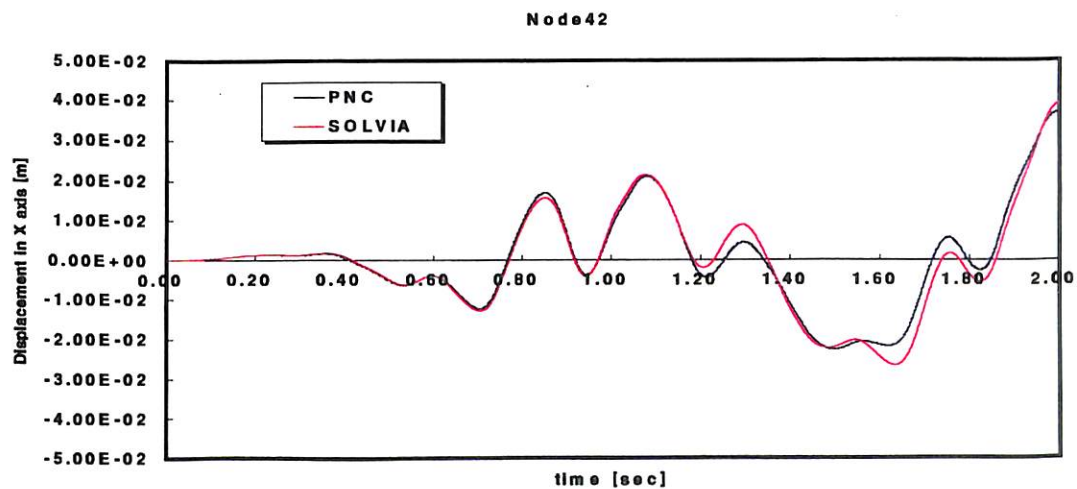


(c) ジョイント要素内のせん断応力；要素番号 201

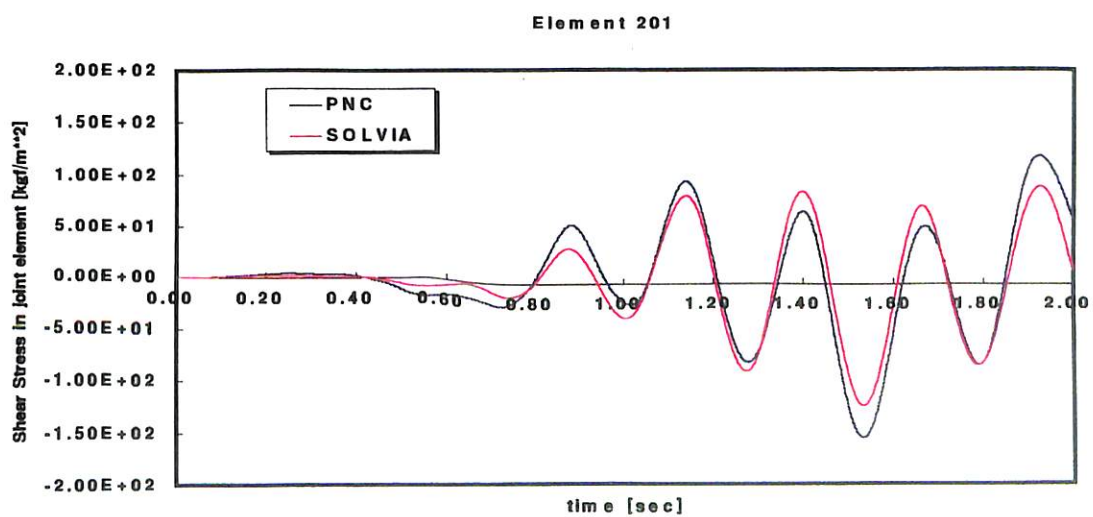
図 3.3.3-1 ベンチマーク解析結果（すべりを生じるジョイント要素を含む場合）



(a) 加振方向の応答変位；節点番号 7



(b) 加振方向の応答変位；節点番号 42



(c) ジョイント要素内のせん断応力；要素番号 201

図 3.3.3-2 ベンチマーク解析結果（すべりを生じないジョイント要素を含む場合）

第4章 振動実験データに基づくモデル／コードの妥当性、パラメータの検討

4.1 はじめに

本年度に防災研殿で実施される人工バリアの振動実験では、これまでの処分坑道横置き縮尺モデルから処分孔縦置き縮尺モデルへと廃棄体の定置方式が変更されており、縮尺も 1/5 スケールから 1/2.5 スケールへと拡大されている。本振動実験の最も大きな特徴としては、緩衝材中の模擬オーバーパックの変形挙動を観察するため、半割の可視化モデルを採用している点である（図 4.1-1）。

昨年と同様、振動実験を行う振動台の制限（供試体の固有周波数が 50Hz 以下であること）により、事前に供試体の固有周波数を把握しておく必要がある。そこで、上記 1/2.5 スケール人工バリアの実固有値解析を行い、現在想定している供試体による振動実験の実施可能性を検討した。また、正弦波およびランダム波を用いた動的応答解析を実施し、振動実験開始前の事前情報として整理した。

4.2 予備解析

4.2.1 1/2.5 スケール人工バリアの実固有値解析

ベントナイトの物性は動燃事業団殿所有の動的試験データより、乾燥密度の異なる 3 つのサンプル（DT-21, DT-24, DT-27）から定めており、切断面における 2 とおりの境界条件（境界条件 A；切断面を含む周辺境界を全て固定したケース、境界条件 B；切断面の加振方向の自由度をフリーと下ケース）に対して、全 6 ケースの解析ケースを設定した（表 4.2.1-1）。せん断剛性は、ひずみに依存しない線形領域と考えられる範囲より幾分保守性を配慮した値を設定した。

表 4.2.1-2 に各解析ケースに対する固有値解析結果を示す。境界条件に係わらず、ベントナイトの乾燥密度が 1.0g/cm^3 以上の場合（DT-24, DT27）は、いずれの解析ケースも固有周波数が 50Hz を超過している。また、モデル周辺を完全固定とした場合は、全てのケース（DT-21, DT-24, DT-27）で 50Hz を超えている。昨年度に実施した 1/5 スケール振動実験モデル（処分坑道横置き）の固有値解析では、ベントナイトの乾燥密度が $1.0[\text{kgf/cm}^2]$ かつ周辺固定条件の下で約 56Hz であったことを考慮すると、縮尺スケールの拡大に伴い固有周波数が全体的に増加したものと解釈することができる。

以上の結果より、本供試体の固有周波数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が予測される。

4.2.2 1/2.5 スケール人工バリアの動的応答解析

上記の解析結果より、大型振動試験装置を用いた 1/2.5 スケール人工バリアの振動実験を行うには、ベントナイトの乾燥密度を 1.0g/cm^3 より小さくしなければなら

ないことが確認された。ここでは、ベントナイトの乾燥密度を 0.7g/cm^3 とし、正弦波およびランダム波を用いた動的応答解析を行い、本モデルの概略の振動特性を把握すること試みた。なお、ここでは境界条件 A のケースについてのみ、解析結果の概要を示す。

図 4.2.2-1～図 4.2.2-2 に、本解析で用いた入力波（正弦波、ランダム波）を示す。正弦波の周期は、境界条件 A、B に関して、固有値解析より求められた基本周波数に相当する値を設定している。これにより、共振域近傍での振動特性を示す最も保守的な評価を行うことが可能になる。

図 4.2.2-3 に、周辺境界を完全固定とした場合（境界条件 A）の正弦波入力に対する加振方向の応答変位および応答加速度を示す。評価点は、図 4.1-1 に示した点 B である。入力で用いた正弦波は、供試体の一次周波数に対応する周期を用いているため、これらの応答はほぼ共振状態にあると考えられる。

図 4.2.2-4 には、ランダム波入力に対する加振方向の応答変位および応答加速度を示す。入力で用いたランダム波は、10Hz～70Hz の周波数成分を含むため、この間に固有周波数が存在するモードに関しては応答の増幅は顕著になると考えられる。しかし、本ケースでは最も小さい固有周期でも 70Hz を超過しているため、約 2 倍程度の増幅にとどまることがわかる。

表 4.2.1-1 材料物性値（実固有値解析）

解析 ケース	供試体 No	ベントナイトの材料物性値				
		乾燥密度 [gf/cm ³]	湿潤密度 ⁽¹⁾ [gf/cm ³]	せん断ひずみ γ [－]	せん断剛性 [kgf/cm ²]	ポアソン比 [－]
1	DT21	0.7	1.44	9.06×10^5	15	0.4
2	DT24	1.0	1.63	9.83×10^5	43	
3	DT27	1.3	1.82	7.41×10^5	68	

(1) 湿潤密度は、ベントナイトの乾燥密度、真密度(2.7g/cm³)および水の密度より換算。

(2) オーバーパックの材料物性は、昨年度と同様、下記の値を採用した。

ヤング率： $E = 2.1E+06$ [kgf/cm²]

ポアソン比： $\nu = 0.3$ [－]

密度： $\rho = 7.8E-03$ [kgf/cm³]

表 4.2.1-2 実固有値解析結果

解析ケース	モード次数	固有周期 T [sec]	固有周波数 f [Hz]	固有円振動数 ω [rad/sec]	備 考
1 (DT-21)	1	1.3355e-2	74.880	470.49	境界条件 A ⁽¹⁾
	2	1.2070e-2	82.849	520.56	
	1	2.9113e-2	34.349	215.82	境界条件 B ⁽²⁾
	2	1.9388e-2	51.578	324.07	
2 (DT-24)	1	8.7796e-3	113.90	715.65	境界条件 A
	2	7.9351e-3	126.02	791.82	
	1	1.8171e-2	55.032	345.77	境界条件 B
	2	1.2744e-2	78.465	493.01	
3 (DT-27)	1	7.0590e-3	141.66	890.09	境界条件 A
	2	6.3799e-3	156.74	984.83	
	1	1.3966e-2	71.604	449.90	境界条件 B
	2	1.0245e-2	97.608	613.29	

(1) 境界条件 A：モデル周辺完全拘束

(2) 境界条件 B：切断面加振方向のみ自由とし、モデル周辺完全拘束

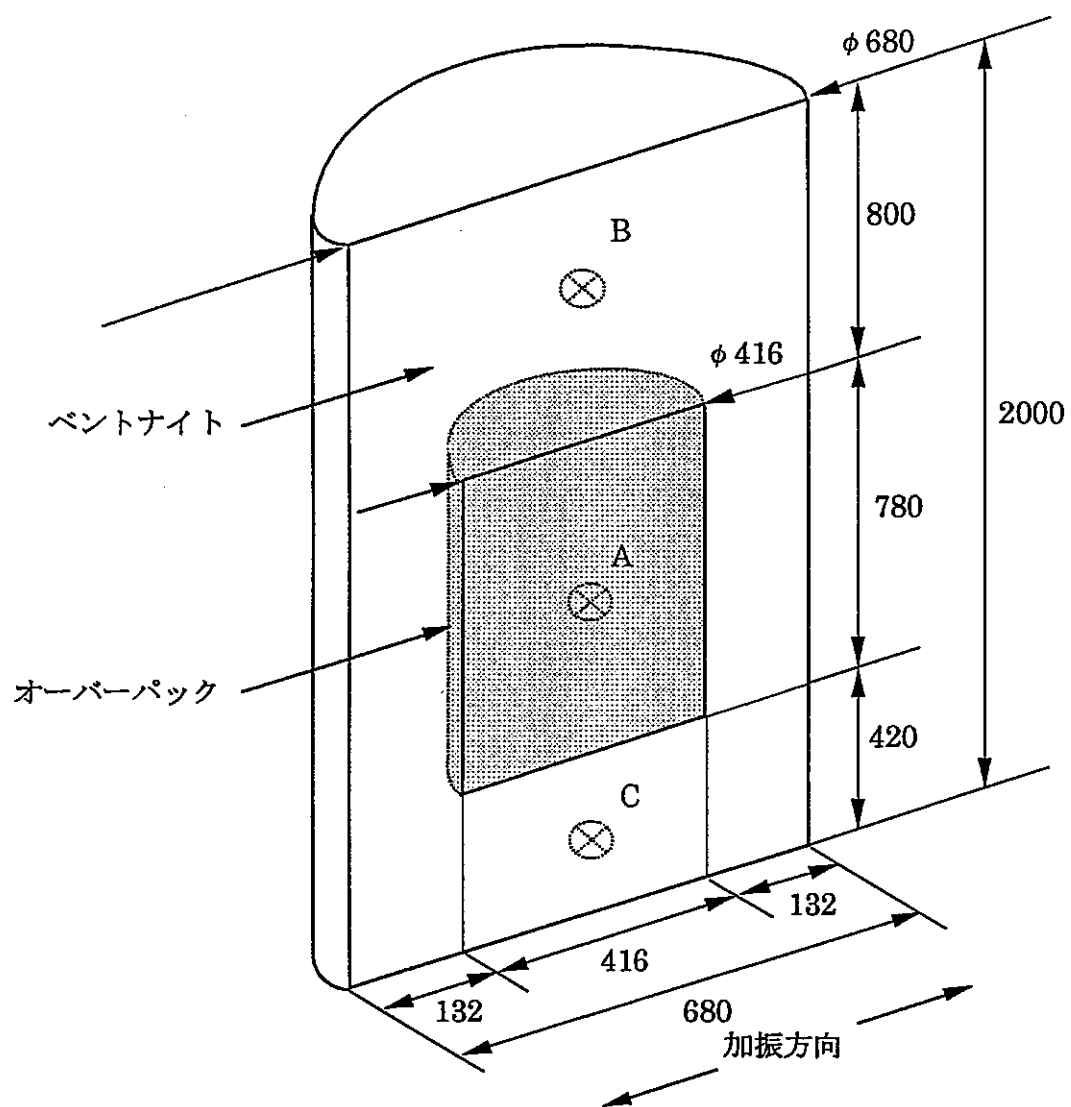


図 4.1-1 1/2.5 スケール人工バリア振動実験モデル

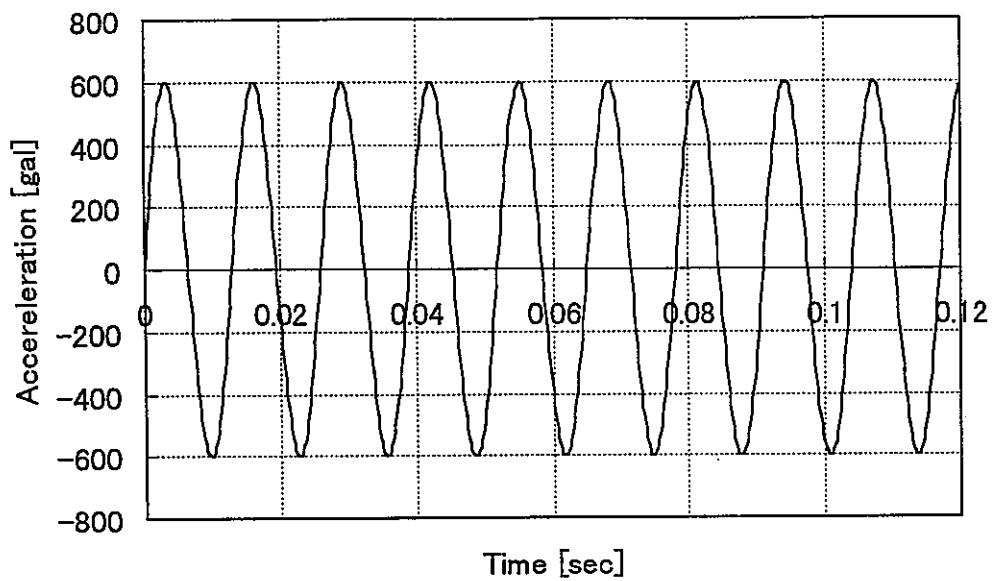
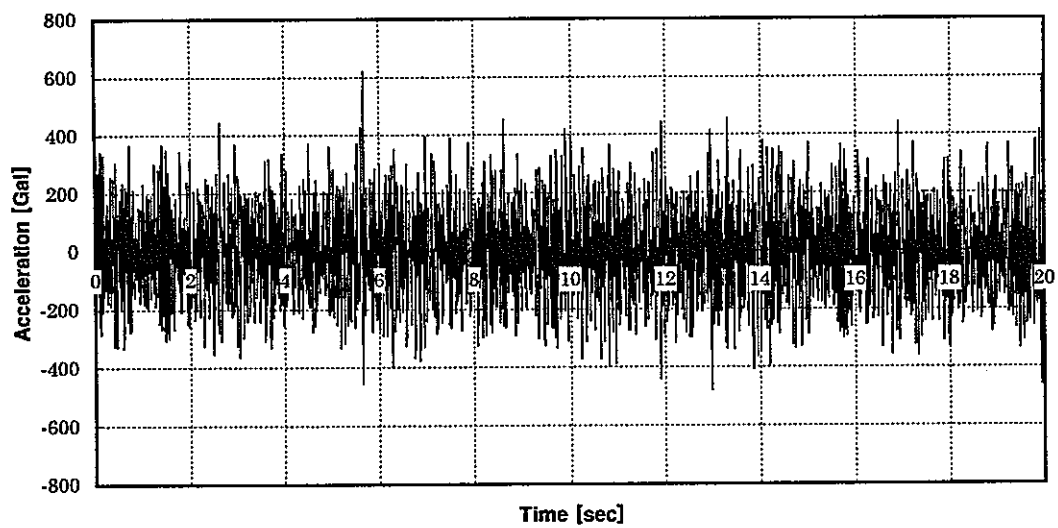


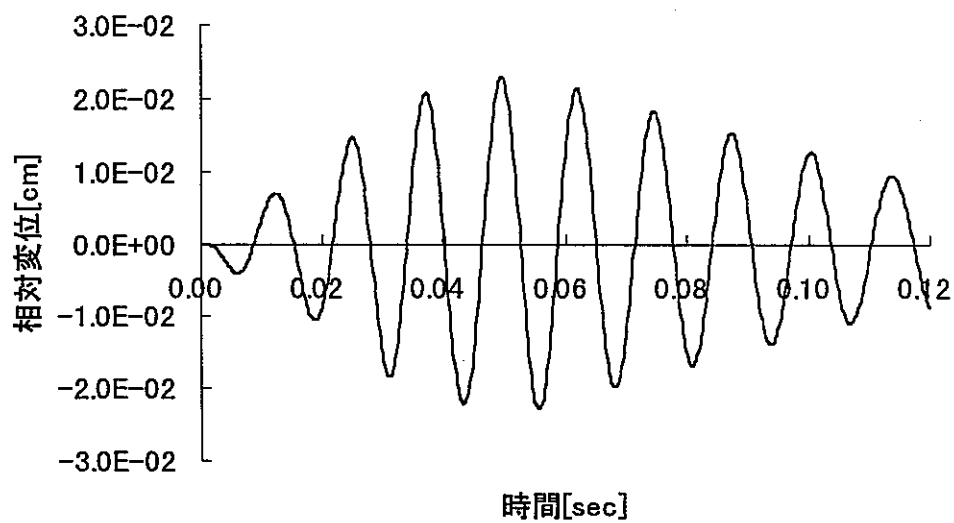
図 4.2.2-1 動的応答解析に用いた正弦波

Random Wave Type A

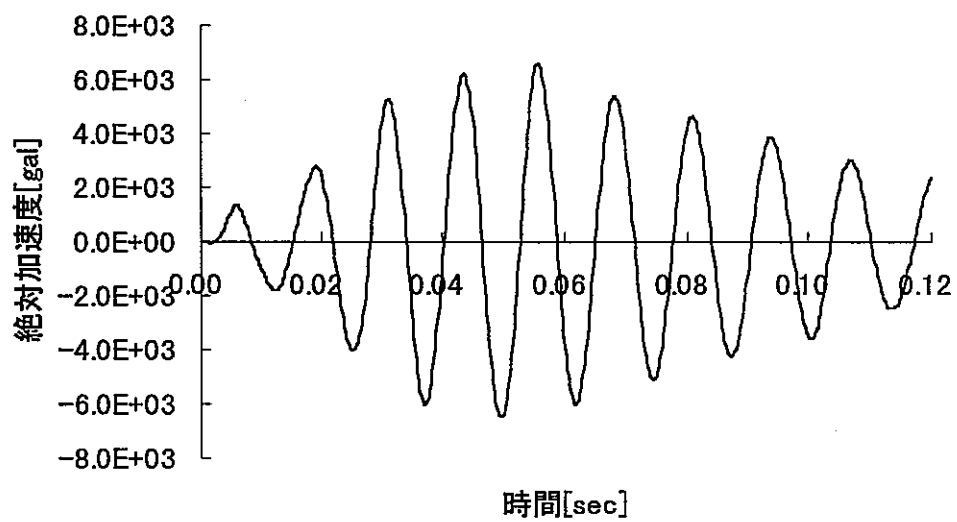


(a) 時刻暦波形

図 4.2.2-2 動的応答解析に用いたランダム波

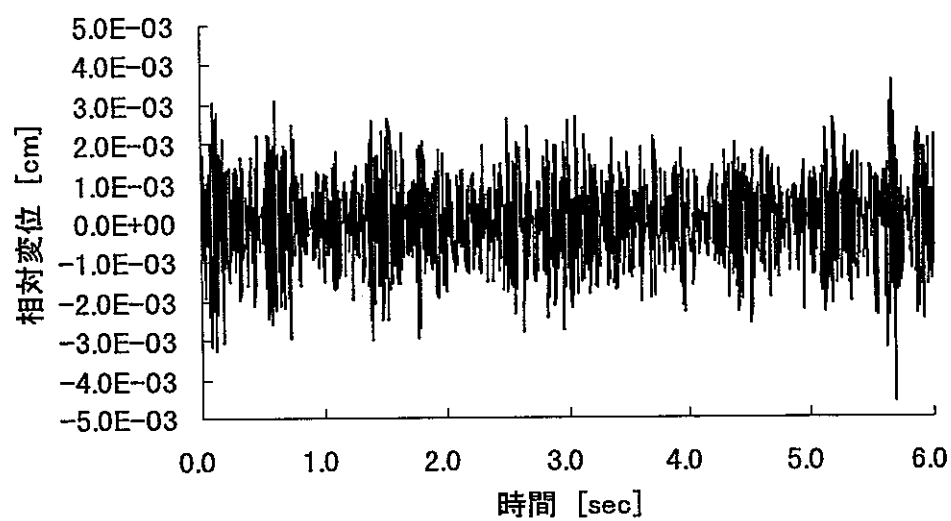


(a) 応答変位

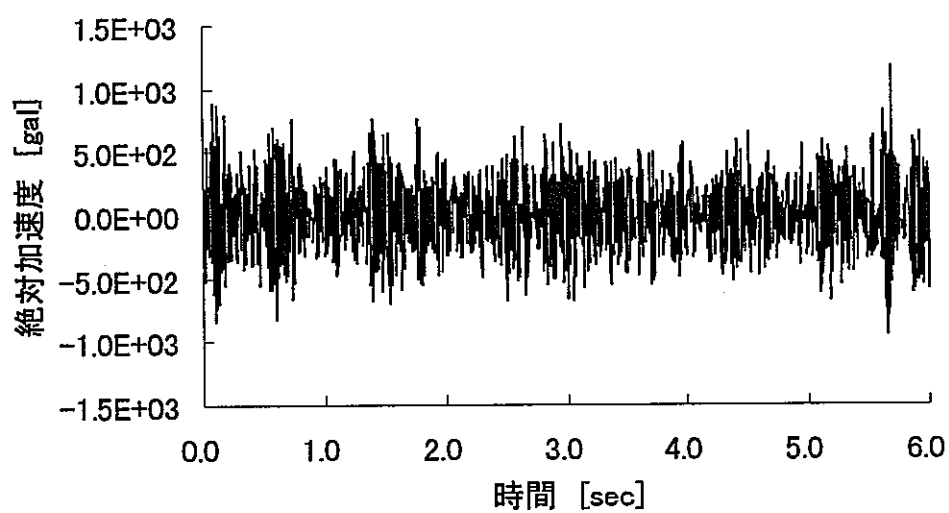


(b) 応答加速度

図 4.2.2-3 正弦波入力に対する応答波形 (評価点 B、境界条件 A)



(a) 応答変位



(b) 応答加速度

図 4.2.2-4 ランダム波入力に対する応答波形 (評価点 B、境界条件 A)

第5章 地質モデルにおける処分場ニアフィールドの耐震安定性の評価検討

5.1 はじめに

昨年度に引き続き、実処分環境を想定したニアフィールドの耐震性評価を行った。本評価では、第2章で作成した深度1000m地点における地震波ならびに動燃殿より提示された地質環境モデルに基づく諸条件を用いるとともに、最新のレファレンスケース（平成9年度現在）に関する仕様を用いることとした。

5.2 レファレンス仕様

5.2.1 評価体系

図5.2.1-1に、平成9年度現在で最新のレファレンスケースに関する人工バリアの仕様（以下、H9仕様）を示す。H3レポートを基に作成した昨年度の仕様（以下、H3仕様）との比較を表5.2.1-1に示す。これより、H9仕様では処分坑道の直径、緩衝材の厚さなどが小さくなっており、全体としてコンパクトな形状になっていることがわかる。岩種については、当面の優先度を考慮し、結晶質岩を対象とすることとした。

なお、処分深度としては地表面下1000mを想定する。

5.2.2 入力地震動の選定

第2章において、エルセントロ波を表層観測波とした場合の、地下1000m地点における地中地震波の推定を行った（2.3節参照）。これにより、地質モデル環境を想定した場合、表層で最大加速度1000Gal程度の地震波がおおよそ5分の1程度に低減することが確認できた。本評価では、例年の解析で使用しているエルセントロ波と併せて、同検討により得られた地下1000mにおける地中地震波を使用する。また、最も保守的な評価の1つとして、評価体系の固有値近傍の周期をもつ正弦加速度を使用する。

5.3 解析ケース

前記の入力地震動に基づき、全8ケースの解析ケースを設定した。表5.3-1に解析ケースを示す。解析ケース1～3は、周辺岩盤を含まない廃棄体－オーバーパッカー緩衝材系を対象としたものであり、解析ケース4～8は、周辺岩盤を含む系を対象としたものである。解析ケース1および4では、それぞれの体系の固有周期を把握するための固有値解析を設けている。解析ケース2～3は、系の固有値近傍の周期をもつ正弦波（最大加速度1000gal）を入力地震動として、緩衝材を線形および非線形材料と仮定した解析を行うものである。これにより、保守的な入力条件下における緩衝材の非線形効果を確認することができる。この結果に基づき、緩衝材の構成則を定めた後、ケース6～8

で 3 種類の入力地震動を用いた動的応答解析を行う。なお、ケース 5 は、周辺岩盤の減衰を考慮しない場合であり、ケース 6 の比較ケースとして設けたものである。これにより、周辺岩盤の減衰の有無による緩衝材への応答特性の相違を把握することができる。

5.4 解析条件

表 5.4-1 にニアフィールドの構成材料に関する主要な物性値を示す。以下に、その他の解析条件に関して、対象とするモデルと解析種別毎に示す。

(1) 岩盤を含まない系

(a) 固有値解析（解析ケース 1）

図 5.4-1(a)に、本固有値解析で使用する解析モデルを示す。岩盤に接する周辺境界面では、ベントナイトが岩盤に固定されているものと仮定し、周辺境界面を構成するすべての節点自由度を固定した。

(b) 動的応答解析（解析ケース 2～3）

図 5.4-1(b)に、本動的応答解析で使用する解析モデルを示す。入力地震動としては共振域近傍の振動モードを示す保守的なケースを考慮し、固有値近傍の周期をもつ正弦波を用いることとする。なお、入力加速度の最大値は 1000gal とした。

岩盤に接する周辺境界に関しては、固有値解析と同様に完全固定とした。対称境界となる切断面に関しては、加振方向の自由度を考慮し、図 5.4-1(b)に併記しており定めた。

(2) 岩盤を含む系

(a) 固有値解析（ケース 4）

図 5.4-2 に岩盤を含む系を対象とした解析モデル図を示す。同図(b)に示した緩衝材部の要素分割は、前記の固有値解析モデル（図 5.4-1）に比較し粗く作成している。

周辺境界を構成する全ての節点自由度に関しては、固定条件とする。内部節点に関しては、計算自由度を低減する観点から、図中に示した加振方向（Y方向）のみ自由とし、他の自由度を拘束した。

(b) 動的応答解析（ケース 5～8）

本動的応答解析で用いるモデルは、隣接する廃棄体を多点拘束条件の導入により考慮するため（3.4 節参照）、岩盤を含まない系で使った対称モデルとすることはできない。従って、図 5.4-2 と同様のモデルを利用することとする。入力地震動としては、以下に示す 3 種類のものを採用する。

- ・エルセントロ波 1 (EL 1) ; 表層観測波
- ・エルセントロ波 2 (EL 2) ; 深部推定波
- ・正弦波 (SW 2) ; モデルの固有値近傍の周期を有する正弦波

なお、モデル底部ならびに上部に関しては粘性境界を設けた。

5.5 解析結果と考察

表 5.3-1 に示した解析ケースのうち、深部地震波を入力地震動とした解析ケース 7 について、主な解析結果を示し考察を行う。

図 5.5-1 に緩衝材内の 4 つの節点で得られた応答加速度を示す。いずれの節点においても同様の応答波形を示しており、顕著な応答増幅が生じていないことが確認できる。これは、緩衝材が剛体として運動していることを意味している。本解析で対象としたモデルの一次固有周波数は約 55Hz であり、これに近い周波数成分を多く含む入力地震動を用いたケースでは、応答の増幅が大きくなることが予測できる。しかしながら、ここで使用した入力波の卓越周波数は高々 5~10Hz 付近であり、応答の増幅はほとんど生じないことが確認できる。

図 5.5-2 に、加振開始から 0.877 秒後の X 軸断面方向から見た絶対変位ならびに絶対加速度の運動モードを示した。図中の実線（黒色）は変形前の運動モードであり、破線（赤色）が変形後の運動モードである。スケールは幾分誇張して示している。モデル上端および下端に粘性境界を設けたことにより、両端面は拘束されることなく波動の伝搬に伴い運動していることが確認できる。また、上下端面近傍における顕著な反射波の存在も認められない。左右の側面に関しては多点拘束条件を適用したことにより、周期的な対称境界が取り込めているため、同一の応答量を示している。

図 5.5-3 には、時刻 0.877 秒時点におけるせん断応力 τ_{yz} ならびにせん断ひずみ γ_{yz} の分布を示した。処分坑道内で発生する応力は、周辺岩盤で約 2kgf/cm^2 であることに對し、 10^{-4} オーダーの極めて低い応力レベルに押さえられており、顕著な応力緩衝性を確認することができる。ひずみ分布に関しては、周辺岩盤領域で 10^{-5} オーダーの様な微小ひずみ状態にあるものの、処分坑道との境界付近では、 10^{-4} オーダーと若干の増加傾向を示している。

表 5.4-1 物性値

材料	ヤング率 E [kgf/cm ²]	ポアソン比 ν [-]	密度 ρ [kgf/cm ³]	減衰係数 [-]
ガラス固化体	⁽¹⁾ 8.200×10^5	⁽²⁾ 0.250	⁽³⁾ 2.20×10^{-3}	—
オーバーパック	⁽³⁾ 2.100×10^6	⁽³⁾ 0.300	⁽³⁾ 7.78×10^{-3}	—
緩衝材	⁽⁴⁾ 1.185×10^8	⁽⁵⁾ 0.500	⁽⁶⁾ 2.0×10^{-3}	⁽⁷⁾ 0.048
岩盤	⁽⁸⁾ 4.900×10^5	⁽⁸⁾ 0.315	⁽⁹⁾ 2.70×10^{-3}	⁽¹⁰⁾ 0.02

- (1) 「地層処分研究情報交換会報告書 INTEGRATE'96」動力炉・核燃料開発事業団より、
「緩衝材大型試験における熱－水－応力連成解析 (pp261～466)」のガラスビーズの値
を引用。
- (2) 機械工学便覧より、ほう珪酸ガラスの値を引用。
- (3) H3 レポートより引用
- (4) 動燃殿所有の動的試験データより、ひずみレベル 1.13×10^{-3} におけるせん断剛性より
算定。RO モデルに関する非線形パラメータ α 、 β は、それぞれ 5.804、1.916。
- (5) 動燃殿所有の動的試験データより。ただし、解析コードへの入力値としては 0.49
で代用 (解析コードの制約上)。
- (6) ベントナイトの乾燥密度 1.6gf/cm^3 を真密度 2.7gf/cm^3 を用いて換算。
- (7) 動燃殿所有の動的試験データより。
- (8) 動燃殿にて実測された結晶質岩の弾性波速度 (V_p, V_s) に関する回帰式より、処分深度
1000m における値を算定。
- (9) $V_s^2 = G / \rho$ の関係より算出。
- (10) 一般的な耐震解析で用いられている値。

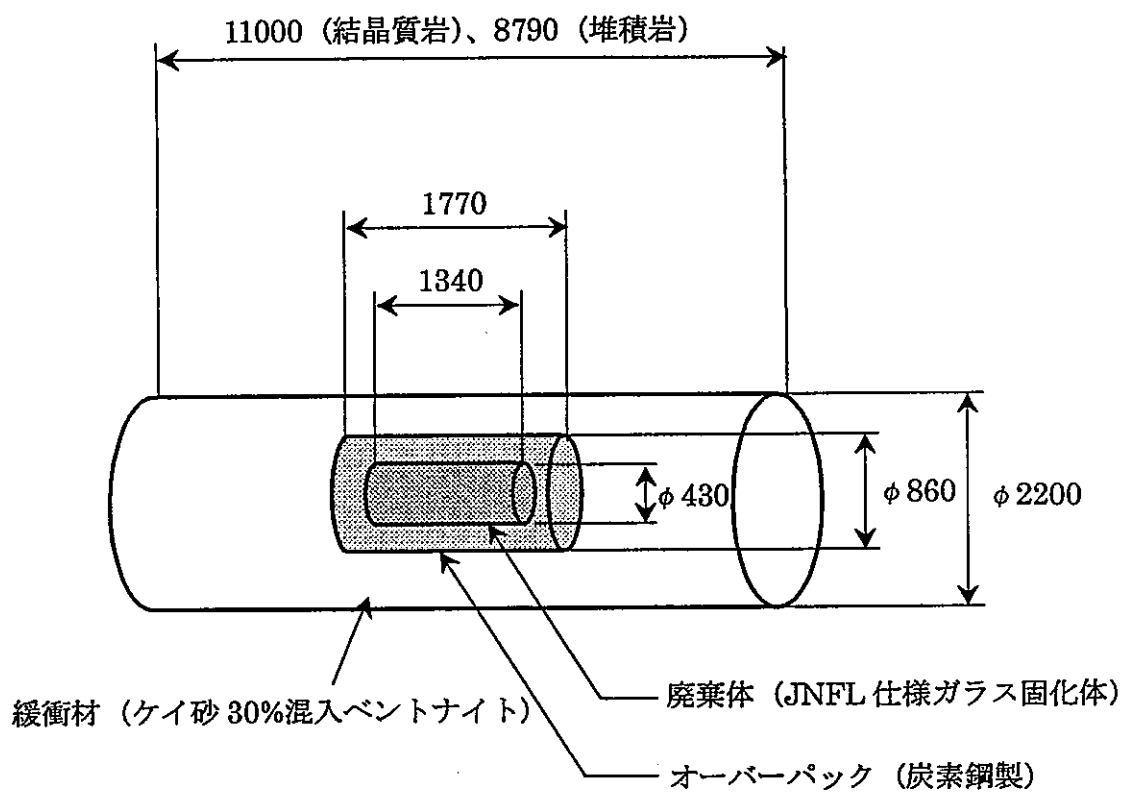
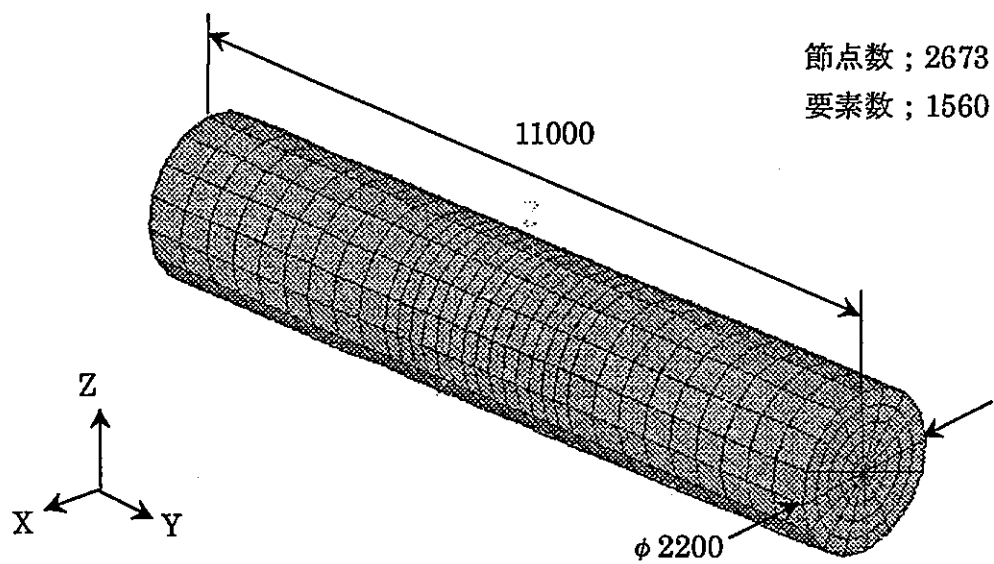
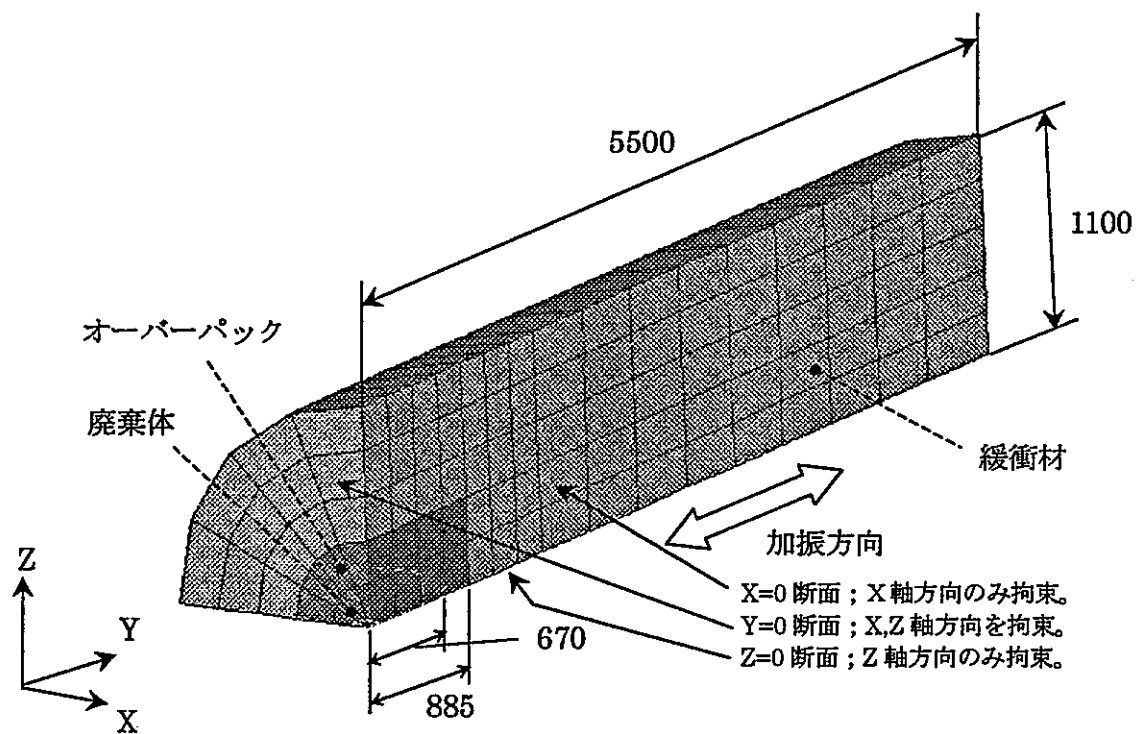


図 5.2.1-1 人工バリアの幾何形状 (単位 ; mm)



(a) 固有値解析モデル (単位 ; mm)



(b) 動的応答解析モデル (単位 ; mm)

図 5.4-1 解析モデル (岩盤を含まない系)

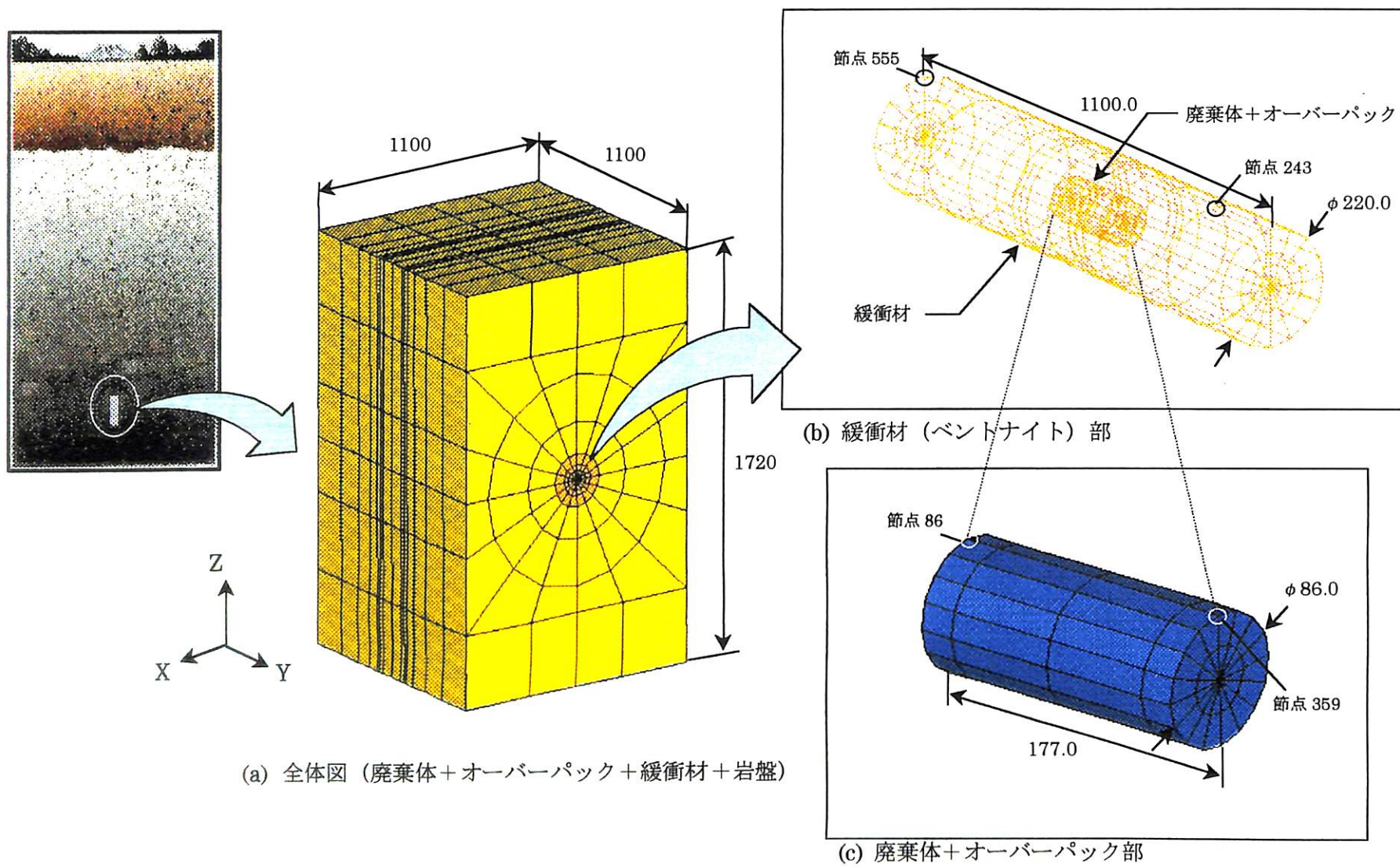


図 5.4.2-1 解析モデル (総節点数 1845、総要素数 2265 ; 単位 cm)

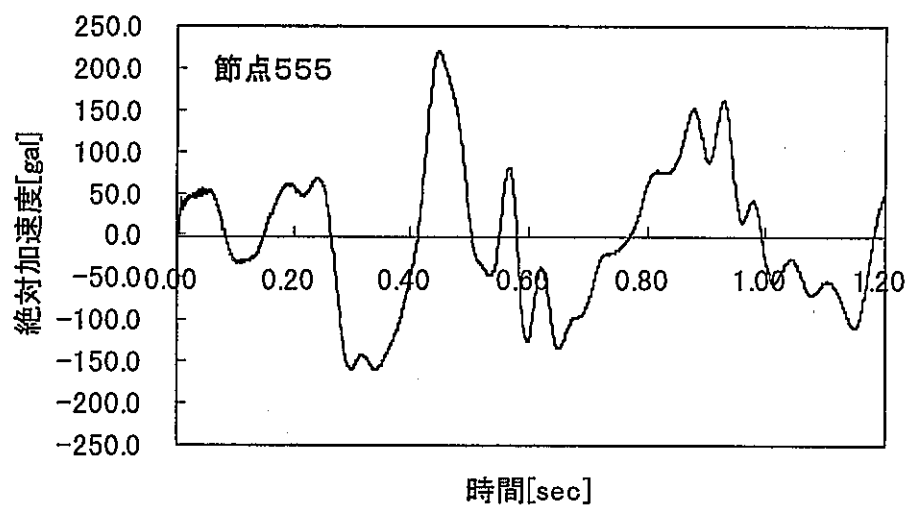
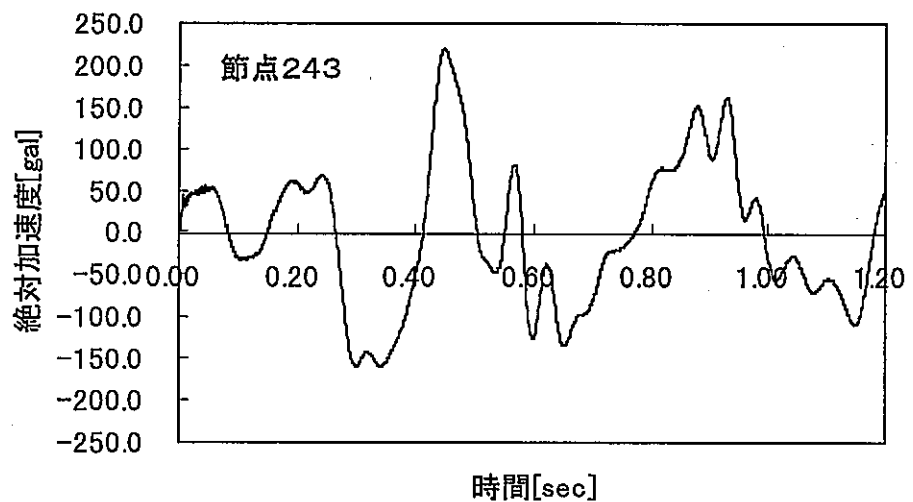
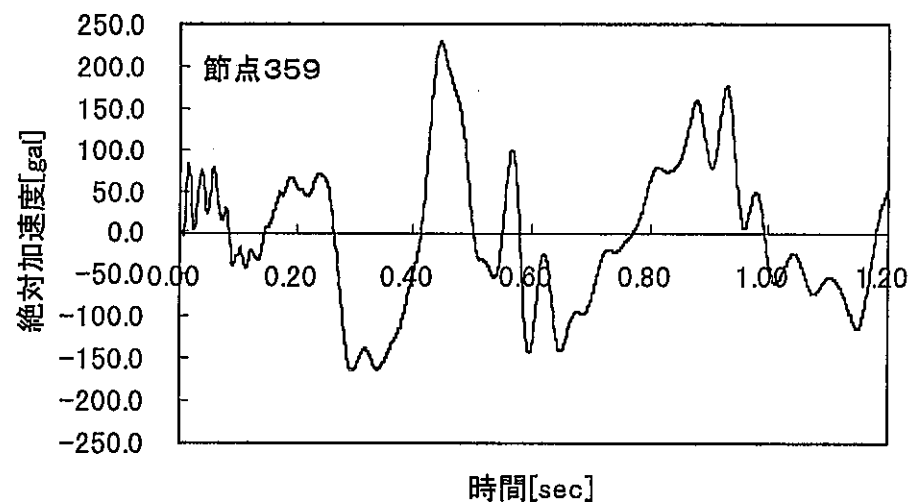
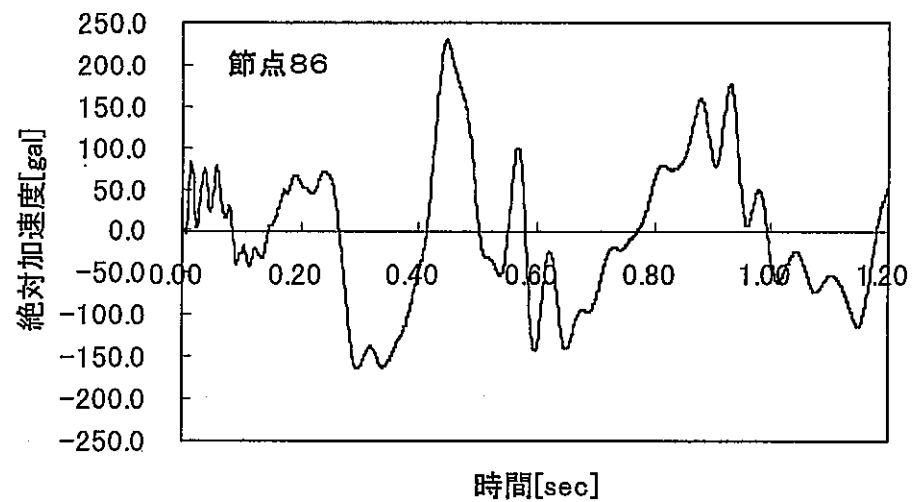
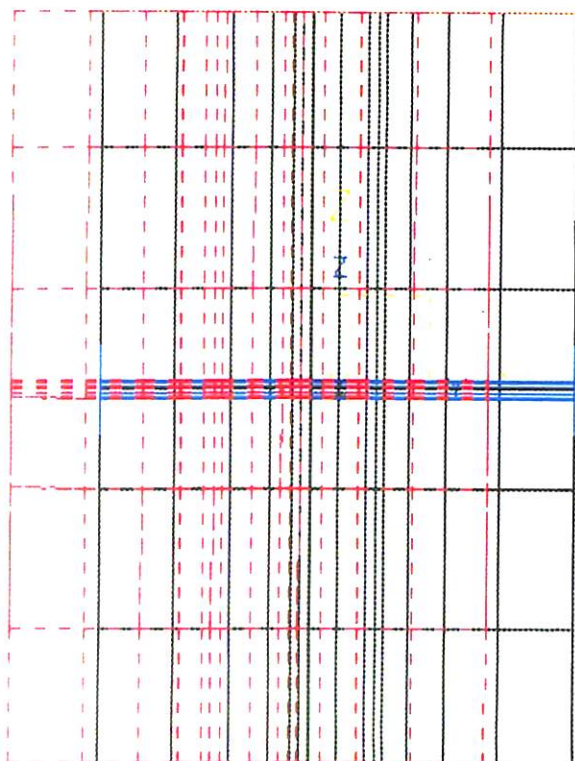


図 5.5-1 緩衝材内の応答加速度 (解析ケース 7)

NODE DATA
 DEFORMATION: 1-B.C. 0, TIME = 0.877, DISPLACEMENT_1
 TIMESTEP: 1 TIME: 0.877
 Displacement - Y MIN: -1.46E+00 MAX: 1.44E+00
 FRAME OF REF: PART

変位モード
 単位 ; cm



NODE DATA
 DEFORMATION: 2-B.C. 0, TIME = 0.877, ACCELERATION_2
 TIMESTEP: 1 TIME: 0.877
 Acceleration - Y MIN: 1.48E+02 MAX: 1.59E+02
 FRAME OF REF: PART

加速度モード
 単位 ; gal

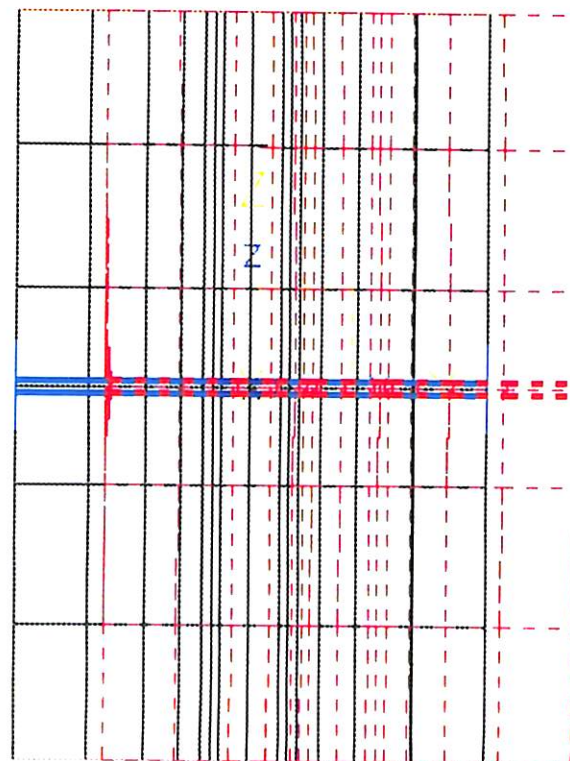
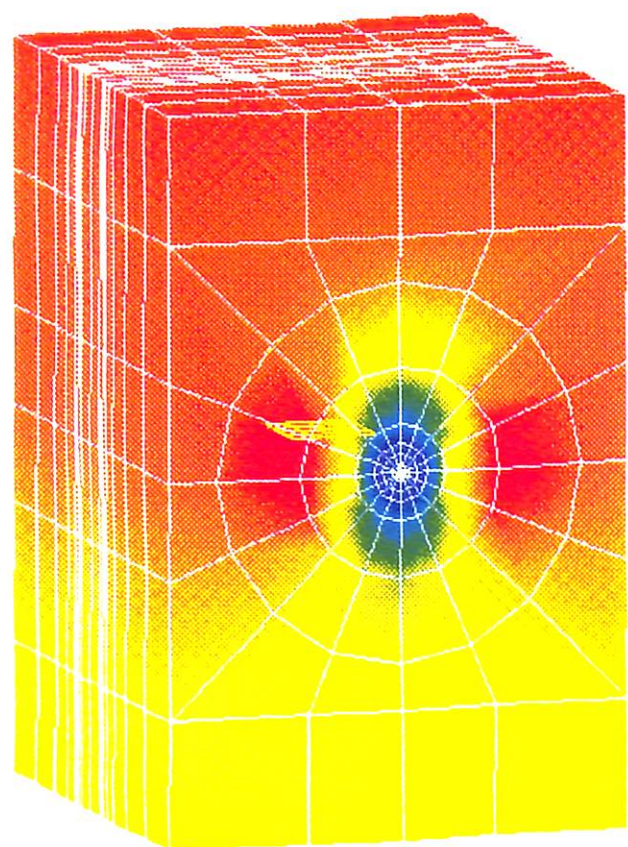


図 5.5-2 運動モード (解析ケース 7、実線 ; 変形前、破線 ; 変形後)

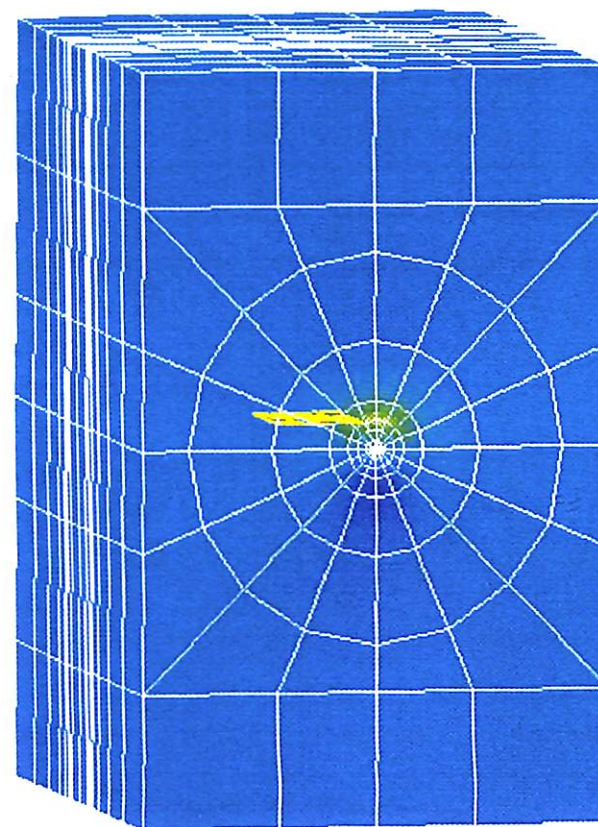
RESULTS: 3-B.C. 0, TIME = 0.877, STRESS_3
 NODATA
 TIMESTEP: 1 TIME: 0.877
 Unknown 6DOF - RY MIN: 9.53E-04 MAX: 2.26E+00
 FRAME OF REF: PART



VALUE OPTION: ACTUAL

2.26E+00
 2.03E+00
 1.80E+00
 1.58E+00
 1.36E+00
 1.13E+00
 9.03E-01
 6.77E-01
 4.52E-01
 2.26E-01
 9.53E-04

RESULTS: 4-B.C. 0, TIME = 0.877, STRAIN_4
 NODATA
 TIMESTEP: 1 TIME: 0.877
 Unknown 6DOF - RY MIN: -3.84E-07 MAX: 5.75E-05
 FRAME OF REF: PART



VALUE OPTION: ACTUAL

5.75E-05
 5.17E-05
 4.59E-05
 4.01E-05
 3.43E-05
 2.85E-05
 2.28E-05
 1.70E-05
 1.12E-05
 5.40E-06
 -3.84E-07

図 5.5-3 応力分布とひずみ分布 (解析ケース 7、左図 ; せん断応力 τ_{yz} [kgf/cm²], 右図 ; せん断ひずみ γ_{yz} [-])

第6章 今後の課題

本年度の研究では、現時点のレファレンスケースに関する諸条件を考慮した解析モデルの構築および解析・評価に焦点をあて、処分深度における地中地震波の推定、解析コードの改良（ジョイント要素の新規導入）、振動実験データ解析ならびにニアフィールドの耐震性評価を実施した。以下に、本作業を通じて得られた課題を整理する。

(1) 入力地震動の設定

昨年度に引き続き、地中地震波に関する検討を行い、表層の地震観測波から任意の地中地震波を推定する手法を整理した。これらの手法は目的に応じて使い分けがなされるものであり、確定的な利用は不可能である。動燃殿の釜石サイトでは、重複反射理論に基づく地中地震波の推定実績があり、実測値と推定結果が良好に一致していることが確認されている。本年度は、これを拠り所に同理論に基づく地中地震波の推定を行った。しかしながら、本研究では表層観測波としてエルセントロ波のような過去の著名地震波の1つを利用している点に少なからず矛盾がある。すなわち、想定した仮想地盤とは別の地盤で観測された地震波を、この仮想地盤の表層観測波として用いていることである。本来であれば、この仮想地盤で実際に得られる表層地震波を用いるべきである。しかしながら、注目している仮想地盤において、深度に応じた振幅低減の効果を現実的に取込むことができた点では意味があるものとする。今後、処分サイトが選定された後には、継続的な地震観測を行い、地中地震波の推定に資する実測データの蓄積を行うことが重要となろう。

(2) 解析コードの高度化

昨年度に優先課題として挙げられた地盤の不連続性をモデル化するためのジョイント要素を新規に導入した。改良したコードの検証は、不連続面の挙動に対する定性的解釈ならびに汎用有限要素解析コード SOLVIA を用いたベンチマーク解析を通じて行い、本解析コードの正確性を確認することができた。昨年度に引き続き、第2次取りまとめに向けた解析コードの機能拡張については、概ね終了したものとする。しかしながら、以下に示す点に関しては、今後とも解析コードの高度化を図る必要があると考えられるため、他の解析ツールとの併用等を含めて、対応策の検討を行う必要がある。

(a) 粘性境界要素、ジョイント要素の周波数応答解析での利用

現バージョンでは、粘性境界要素やジョイント要素は時間領域での利用を前提としている。従って、等価線形解析などの周波数応答解析を行う場合は、これらの要素を併用することはできない。第二次とりまとめに向けて、緩衝材の

非線形挙動に着目する等、様々なモデル化条件における耐震性評価を行う必要がある。今後、解析種別により利用制限のある機能に関しては、当面の必要性ならびに緊急性を考慮し、解析コードの改良を行う必要がある。

(b) CRAY 機版解析コードのワークエリアの修正

本年度の機能追加を含めた最新版のソースコードは、これまでの EWS バージョンに加えて、動燃殿所有の CRAY 機バージョンが用意されている。ただし、CRAY 機バージョンのソースプログラムは、EWS バージョンのソースプログラムを母体として改良したものであり、使用するワークエリアの再確保までは対処しきれていない。第 2 次取りまとめに向け、解析モデルが大規模化になり、使用するワークエリアも大きくなるため、ワークエリアの最適化の観点から CRAY 機バージョンの改良を行う必要がある。

(c) 初期応力解析機能の高度化

現解析コードには、自重環境下における静解析機能が備わっており、バイナリ形式の初期応力ファイルを出力するようになっている。この初期応力ファイルは、連続して行う動的応答解析の初期条件として、自動的に読み込むことが可能になっている。しかしながら、土被り等を考慮した一定の外荷重条件下での静解析を行う機能は有していない。これらを考慮する場合は、慣性力および減衰力を無視した仮想的な動的応答解析を行った後にリスタート機能を用いた連続解析を行うか、他の解析コードを使用して初期の応力場を予め求めておき、別途入力カードで指定するなどの方法が考えられる。いずれにしても、解析モデルが大規模になり、使用する要素種別が多岐にわたる場合には、手入力による作業が多く介在し、入力データを作成する労力が多大となる。このようなケースに対処すべく、解析コードの改良ないしツールの整備を行う必要がある。

その他、第 2 次取りまとめに向けた公式バージョンとして、国際ベンチマーク問題を用いた検証解析や関連ドキュメントの整備等を通じ、解析コードの品質向上を進めることが重要である。

7. あとがき

昨年度に引き続き、実規模想定下の耐震性評価を行い、動燃殿の第2次取りまとめレポート作成に向けた予察的な知見を得ることができた。また、平成4年度より開発してきた3次元地震応答解析コードも、ほぼ実用化の段階に達しつつある。

本年度の研究は、現時点で設定されている最新のレファレンスケースに関する諸条件を用いた一連の解析評価を行えた点で大きな意味がある。今後は、実測データに基づく解析評価を行う機会が増えていくことが予測され、それらのデータが示す現象を深く理解するとともに、解析結果の保守性ならびに現実性を確保することが重要となろう。さらには、効率的な解析業務の遂行ならびに解析結果に対する品質の確保が、国内外に広く公開される2000年レポートに対して一層重要な因子になるものと考えている。

8. 参考文献

- － 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-」
- － 酒井、沢田、他「時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究」土木学会論文集 No.577/I-41, 53-64,1997.10
- － K.Toko, T.Sato,etc. ' Identification of Structural Parameter and Input Ground Motion from Response Time Histories' Structural Eng. Earthquake Eng. Vol.6 No.2, 413s-421s. October 1989 Japan society of Civil Engineers(Prof. Of JSCE No.410/I-12)
- － 星谷、丸山「非線形構造系の地震時挙動特性の同定」土木学会論文集 第 386 号／I-8 1987 年 10 月
- － 丸山、星谷 「構造系の地震時非線形挙動特性の同定」 土木学会第 42 回年次学術講演会 昭和 62 年 9 月
- － K.Toki, T.Sato, F.Miura ' Separation and Sliding Between Soil and Structure during Ground Moption' Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 9, 263-277(1981)
- － R.E.Goodman, R.L.Taylor, T.L.Brekke, 'A Model for the Mechanics of Jointed Rock', Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. May, 1968